

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAÏA



FACULTE DES SCIENCES EXACTES  
DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE  
MEMOIRE DE MASTER  
OPTION : SYSTEME D'INFORMATION AVANCÉ

---

**Thème**

---

**EVALUATION COMPARATIVE DES  
PROTOCOLES DE ROUTAGE INTERMITTENT  
POUR LES RESEAUX TOLERANT AUX  
DELAIS : UNE ETUDE BASEE SUR LE  
SIMULATEUR **ONE****

---

*Présenté par :*

AFFANE Mohamed    CHERANA Rabeh

*Soutenu devant le jury composé de :*

<i>Président</i>	M. SAADI Mustapha	M.C.B	U. A/MIRA BEJAÏA
<i>Examineur</i>	M. MOHAMMEDI Mohamed	M.C.A	U. A/MIRA BEJAÏA
<i>Encadrant</i>	M. TOUAZI Djoudi	M.C.B	U. A/MIRA BEJAÏA

PROMOTION 2023-2024



## Remerciements

Nous Remercions Dieu, le plus puissant de nous avoir donné la  
Force et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier très chaleureusement **Monsieur Touazi Djoudi** pour son encadrement.  
Ses conseils, sa patience, et la confiance qu'il nous a accordée, tous ont été déterminants dans la  
Réalisation de ce travail de recherche.

Nous adressons nos sincères remerciements à **Monsieur SAADI Mustapha**, président du jury,  
pour avoir accepté de juger ce travail et pour ses précieux conseils.

Nos plus vifs remerciements vont également à **Monsieur MOHAMMEDI Mohamed**, membre  
du jury, pour l'intérêt porté à ce travail et pour ses remarques pertinentes.

Sans oublier l'ensemble du corps enseignant de l'université de Bejaia, qui nous a encadré et  
Enseigner tout au long de notre parcours universitaire, ainsi que tous nos collègues en Master 2.  
Enfin, nous souhaitons remercier tout particulièrement nos familles et surtout nos parents pour  
Leurs courages et leurs sacrifices, et de nous avoir accordé la liberté d'action et la patience  
Nécessaires pour bien mener ce travail, ainsi que toutes les personnes qui nous ont soutenus.

## **Dédicaces**

Je dédie ce mémoire à ma famille, dont le soutien et l'amour m'ont porté jusqu'ici.

À mes amis, pour leur patience et leurs encouragements sans faille.

À mes professeurs et encadrants, pour leur sagesse et leur guidance tout au long de ce parcours académique.

Et enfin, à tous ceux qui m'ont inspiré et motivé à persévérer, je vous exprime ma plus profonde gratitude.

Mohamed

## **Dédicaces**

À mes parents, pour leur amour inconditionnel et leur soutien constant.

À mes amis, pour leur encouragement et leur compréhension.

À mes professeurs et mentors, pour leur guidance et leur inspiration.

Et enfin, à tous ceux qui croient en moi et m'ont aidé à réaliser ce travail.

Rabeh

# TABLE DES MATIERES

Table des matières .....	i
Table des Figures .....	v
Liste des Abréviations .....	vi
Introduction Générale .....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les DTNs .....	2
1. INTRODUCTION:.....	3
2. Brève Histoire des réseaux .....	3
2.1 Réseaux filaires :.....	3
2.2 Réseaux sans fil : .....	4
2.3 Réseaux mobiles :.....	5
2.4 Réseaux ad hoc :.....	5
3. Les Réseaux tolérants aux délais DTN : .....	6
4. Caractéristiques des réseaux DTNS: .....	7
4.1 L'incertitude du délai de réseau :.....	7
4.2 Connexion intermittente :.....	7
4.3 Temps d'attente important :.....	8
4.4 Délais longs et variables :.....	8
4.5 Débits de données asymétriques :.....	8
4.6 Taux d'erreur élevés :.....	8
4.7 Multiplicité des protocoles :.....	8
5. Concept de BASE:.....	8
6. Architecture des DTNS:.....	9
6.1 La couche bundle : .....	9
6.2 La couche de convergence :.....	10
6.3 Encapsulation de Bundle :.....	10
7. Les entités de COMMUNICATIONS:.....	11
7.1 Les nœuds DTN :.....	11
7.2 Nommage et Adressage dans les DTNs :.....	12
8. Fonctionnement d'un DTN:.....	13

8.1	Principe du Store-and-Forward:	13
8.2	Le protocole Bundle :	14
8.3	Protocole Non Conversationnel:	15
9.	Fiabilité dans les réseaux DTNs :	16
9.1	Transfert de garde :	16
9.2	Approches de fiabilité :	17
9.3	Congestion dans les réseaux DTNs :	18
10.	Applications des réseaux tolérants aux délais :	18
	<b>Conclusion :</b>	20
	Chapitre 2 : routage dans les DTNs.....	21
1.	Introduction:	22
2.	Etapas de routage:	22
3.	Types de routage dans les dtn .....	23
3.1	Routage proactif et Routage réactif.....	23
3.1.1	Routage proactif .....	23
3.1.2	Routage réactif.....	23
3.2	Routage déterministe et Stochastique .....	24
3.3	Routage Par Source Et Routage Par Saut .....	24
3.3.1	Routage par Source.....	24
3.3.2	Routage par Saut.....	24
4.	Défis de routage dans les DTN.....	25
5.	Modèles de mobilités pour les DTN.....	26
5.1	Random Mobility MODELS :	26
5.1.1	Random Walk:	26
5.1.2	Random Waypoint (RWP) :	26
5.2	Geographic Mobility Models:	27
5.2.1	Grid Model .....	27
5.2.2	Geographic Trace Models .....	27
5.3	Social Mobility Models :	28
5.3.1	Community-Based Model .....	28
5.3.2	Human Mobility Models .....	28

6.	Protocoles de routage dans les DTNs : .....	29
a)	<b>Flooding-Based Routing</b> .....	29
b)	<b>Forwarding-Based Routing</b> .....	29
6.1	Epidemic .....	29
6.2	PROPHET .....	31
6.3	MaxProp .....	32
6.4	Spray And Wait.....	33
6.5	Direct Delivery .....	34
Chapitre 3 : Analyse et résultats .....		35
1.	Présentation de l'environnement de simulation .....	36
2.	Métriques de comparaison .....	38
2.1	Delivery ratio (Taux de livraison) : .....	38
2.2	Latency Average (Latence moyenne) : .....	38
2.3	Overhead Ratio : .....	38
3.	Simulation .....	38
3.1	Paramètres de simulation .....	39
3.2	Scenario 1 : Impact du nombre des nœuds : .....	39
3.2.1	Overhead ratio .....	39
3.2.2	Taux de livraison .....	40
3.2.3	Latence Moyenne: .....	41
3.3	Scenario 2 : Impact de la vitesse des nœuds : .....	42
3.3.1	Overhead ratio .....	42
3.3.2	Taux de Livraison.....	43
3.3.3	Latence Moyenne .....	44
3.4	Scenario 3 : Impact de la taille de la mémoire tampon .....	44
3.4.1	Overhead ratio .....	45
3.4.2	Latence moyenne.....	46
3.4.3	Taux de Livraison.....	47
3.5	Scenario 4 : Impact du TTL (Time to Live) des MESSAGES : .....	48
3.5.1	Overhead ratio .....	48
3.5.2	Latence moyenne.....	49



3.5.3	Taux de livraison .....	50
4.	Stratégie D'Optimisation .....	51
5.	Conclusion.....	51
	Conclusion Générale et Perspectives .....	52
	Annexes.....	54
	Bibliographie .....	55

## TABLE DES FIGURES

<b>Figure 1:</b> Transfert en utilisant un nœud intermédiaire.....	7
<b>Figure 2:</b> Comparaison des capacités de transmission d'un système « bout en bout » et d'un système « store and forward » .....	9
<b>Figure 3:</b> La couche bundle .....	10
<b>Figure 4:</b> Encapsulation des Bundles dans les DTN .....	11
<b>Figure 5:</b> Les Différents rôles d'un nœud DTN .....	12
<b>Figure 6:</b> mechanism de Store and Forward.....	13
<b>Figure 7:</b> Couches bundle comprenant le protocole bundle.....	14
<b>Figure 8:</b> Les options de livraisons offertes par la couche bundle. ....	15
<b>Figure 9:</b> Protocole non conversationnel .....	16
<b>Figure 10:</b> Transfert de garde .....	17
<b>Figure 11:</b> Concept DakNet.....	20
<b>Figure 12:</b> Principe de Protocol Epidemique .....	30
<b>Figure 13:</b> Principe de Protocol PROPHET .....	32
<b>Figure 14:</b> l'interface du ONE simulateur .....	37
<b>Figure 15:</b> Aperçu de l'environnement de simulation ONE.....	37
<b>Figure 16:</b> Overhead ratio en fonction du nombre des nœuds.....	39
<b>Figure 17:</b> Taux de livraison en fonction du nombre des nœuds.....	40
<b>Figure 18:</b> Latence moyenne en fonction du nombre des nœuds .....	41
<b>Figure 19:</b> Overhead ratio en fonction de la vitesse des nœuds.....	42
<b>Figure 20:</b> Taux de livraison en fonction de la vitesse des nœuds .....	43
<b>Figure 21:</b> Latence moyenne en fonction de la vitesse des nœuds .....	44
<b>Figure 22:</b> overhead ration en fonction de la mémoire tampon.....	45
<b>Figure 23:</b> Latence moyenne en fonction de la mémoire tampon.....	46
<b>Figure 24:</b> Taux de livraison en fonction de la mémoire tampon .....	47
<b>Figure 25:</b> Overhead ratio en fonction du TTL.....	48
<b>Figure 26:</b> Latence moyenne en Fonction De TTL .....	49
<b>Figure 27:</b> Taux de livraison en fonction du TTL.....	50

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS**

**ADSL** : Asymmetric Digital Subscriber Line

**DNS** : Domain Name System

**DTN** : Delay Tolerant Network

**EID** : Endpoint Identifier

**IPN** : Internet Interplanétaire

**MANET** : Mobile Ad-hoc NETWORK

**SMS** : Short Message Service

**TCP/IP** : Transmission Control Protocol/Internet Protocol.

**TTL** : Time To Live

**URI** : Uniform Resource Identifier

# INTRODUCTION GENERALE

La communication et le transfert de données sont devenus des aspects fondamentaux de notre monde moderne, facilitant la collaboration, le commerce, et la connectivité globale. Le développement des réseaux a révolutionné notre manière de vivre et de travailler, en permettant des interactions instantanées et sans frontières. Depuis les premières expériences de télécommunications jusqu'aux réseaux avancés actuels, l'évolution de ces systèmes a été marquée par des innovations continues et des adaptations aux besoins changeants de la société.

Malgré les avancées spectaculaires dans les technologies de réseau, il existe encore des environnements où la connectivité est intermittente, les délais de communication sont imprévisibles, et les infrastructures de réseau traditionnelles sont impraticables ou inaccessibles. Ces conditions posent des défis significatifs pour la transmission fiable et efficace des données. Les environnements tels que les zones rurales isolées, les régions touchées par des catastrophes naturelles, les missions spatiales, et les réseaux de capteurs mobiles illustrent la diversité des situations où les réseaux traditionnels échouent à fournir une connectivité adéquate.

Dans ce mémoire nous explorons en profondeur les Réseaux Tolérants aux Délais (DTNs), une avancée significative dans le domaine des réseaux, particulièrement pertinente dans des environnements où la connectivité est intermittente ou les délais de communication sont imprévisibles. Les DTNs offrent des solutions pour des scénarios variés, allant des missions spatiales aux réseaux ruraux, en passant par les applications de capteurs mobiles. Leur capacité à gérer des connexions irrégulières et des débits asymétriques ouvre des possibilités pour des communications robustes et fiables dans des conditions autrement difficiles.

Dans ce contexte, ce mémoire se divise en plusieurs sections clés : une revue de la littérature sur l'histoire et les types de réseaux, une analyse des caractéristiques et de l'architecture des DTNs, et une discussion des protocoles et des modèles de mobilité spécifiques à ces réseaux. Chaque chapitre vise à approfondir la compréhension des défis et des opportunités associés aux DTNs, soutenu par des simulations et des analyses comparatives.

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES DTNS

## **1. INTRODUCTION:**

Inspirés par la popularité croissante de l'informatique dans les années 1970, les chercheurs ont commencé à développer des technologies de routage pour des emplacements informatiques non fixes. Le domaine du routage ad-hoc était inactif tout au long des années 1980, mais l'utilisation généralisée des protocoles sans fil a ravivé l'intérêt dans les années 1990 avec l'émergence des réseaux ad-hoc mobiles (MANET). Le réseau ad-hoc véhiculaire est également devenu un domaine d'intérêt croissant pour les chercheurs.

En parallèle mais séparément des activités MANET, une proposition concernant l'Internet Interplanétaire (IPN) a été financée pour développer des technologies novatrices pour l'IPN. Le pionnier de l'Internet Vint Cerf et d'autres ont développé l'architecture initiale de l'IPN, pertinente pour la nécessité de technologies de réseau capables de faire face aux retards significatifs et à la corruption des paquets dans les communications spatiales profondes.

En 2002, Kevin Fall a commencé à adapter certaines des idées de l'IPN pour concevoir des réseaux terrestres. Il a inventé le terme "réseaux tolérants aux délais" avec l'acronyme DTN. Le premier article de conférence présenté en 2003 a exposé les motivations des DTN. Dans les années suivantes, de plus en plus d'attention a été attirée par les chercheurs, avec un nombre croissant de conférences académiques sur les réseaux tolérants aux délais et aux perturbations, ainsi qu'un intérêt croissant pour la combinaison du travail sur les réseaux de capteurs et les MANET avec le travail sur les DTN. Les travaux de recherche sur le sujet ont débuté par des optimisations sur les algorithmes classiques de routage ad-hoc et de réseaux tolérants aux délais, pour ensuite examiner des problèmes tels que la sécurité, la fiabilité, la vérifiabilité et d'autres questions bien comprises dans le domaine des réseaux informatiques traditionnels

## **2. BRÈVE HISTOIRE DES RÉSEAUX**

Les réseaux ont parcouru un long chemin, évoluant des connexions physiques vers des structures dynamiques et auto-organisatrices. Voici un aperçu de leur histoire, mettant en lumière différents types et leurs caractéristiques :

### **2.1 RESEAUX FILAIRES :**

Les réseaux filaires ont été la base des systèmes de communication modernes. La première génération de réseaux filaires était axée sur la communication vocale et utilisait des signaux analogiques. La deuxième génération a introduit les signaux numériques et la messagerie texte, tandis que la troisième génération a apporté la transmission de données à haute vitesse et les services multimédias.

A) **Caractéristiques et limitations :**

**Haute vitesse et fiabilité :** Non affectés par les interférences, les réseaux filaires offrent des vitesses élevées constantes et des connexions fiables.

**Sécurité :** Les dispositifs connectés physiquement rendent l'accès non autorisé plus difficile.

**Inconvénients :** Mobilité limitée à cause des câbles, installation et maintenance coûteuses sur de grandes surfaces.

B) **Terminaux / retransmission :** Dans les réseaux filaires, les terminaux tels que les ordinateurs, les serveurs et les imprimantes sont généralement connectés à un hub ou un switch central à l'aide de câbles physiques. Des dispositifs de retransmission, tels que des répéteurs ou des amplificateurs, sont utilisés pour étendre la distance sur laquelle les données peuvent être transmises. Ces dispositifs amplifient ou régénèrent le signal pour garantir une transmission fiable sur de longues distances.

## 2.2 RESEAUX SANS FIL :

Les réseaux sans fil ont connu une transformation remarquable. Des premières découvertes sur les ondes radio à la fin des années 1800 aux possibilités de transmission de données explorées dans les réseaux radio à paquets des années 1960, le terrain était préparé. L'invention du Wi-Fi à la fin des années 1990 a marqué un tournant, permettant aux appareils de se connecter et de partager des données sans fil dans les maisons et les bureaux. Aujourd'hui, avec des vitesses, des capacités et des portées toujours croissantes offertes par les normes Wi-Fi, les réseaux sans fil sont devenus l'épine dorsale de notre monde interconnecté. En regardant vers l'avenir, des connexions encore plus rapides, une couverture plus large et des technologies innovantes promettent de porter la communication sans fil à de nouveaux sommets.

A) **Caractéristiques :**

**Mobilité :** Les appareils peuvent se connecter de n'importe où dans la portée du réseau.

**Commodité :** Pas besoin de câbles, installation et extension plus faciles.

**Inconvénients :** Sensibles aux interférences provenant d'autres réseaux ou d'obstacles, potentiellement des vitesses et une sécurité inférieure par rapport aux réseaux filaires.

B) **Terminaux / retransmission :**

Dans les réseaux sans fil, les terminaux sont des appareils mobiles tels que des ordinateurs portables, des smartphones ou des tablettes. Des dispositifs de retransmission, tels que des stations de base ou des points d'accès (routeurs), sont utilisés pour recevoir et retransmettre des signaux vers et depuis les terminaux. Ces dispositifs jouent un rôle crucial dans le maintien de la connectivité et la garantie d'une transmission de données fiable.

### 2.3 RESEAUX MOBILES :

Les réseaux mobiles ont encore élargi la portée de la communication sans fil. Ils sont construits sur la technologie cellulaire, où les zones géographiques sont divisées en cellules couvertes par des stations de base.

Tout a commencé dans les années 1970 avec des téléphones volumineux et des réseaux 1G analogiques pour les appels vocaux. Les années 1990 ont vu le passage aux réseaux numériques 2G, introduisant des protocoles standardisés et la messagerie SMS, préparant le terrain pour les services de données de base. Le 21e siècle a apporté la révolution de l'internet mobile. Les réseaux 3G ont permis une navigation web rudimentaire et le courrier électronique, tandis que la 4G a offert un bond significatif en termes de vitesse, soutenant des activités telles que le streaming vidéo et les applications mobiles. Aujourd'hui, la 5G promet d'ouvrir une ère de connexions ultra-rapides, ouvrant la voie à des applications transformatrices et consolidant les réseaux mobiles comme l'épine dorsale de notre monde connecté.

#### A) Caractéristiques :

**Couverture étendue :** Les réseaux mobiles offrent un accès à internet dans de nombreuses régions, même les plus éloignées.

**Portabilité :** Connexion depuis pratiquement n'importe où avec une couverture cellulaire.

**Inconvénients :** Limites d'utilisation des données, coût potentiel selon le plan, vitesses variables selon l'emplacement et la congestion du réseau.

#### B) Terminaux / retransmission :

Dans les réseaux mobiles, les terminaux sont des appareils mobiles tels que les téléphones mobiles qui peuvent se déplacer entre différents emplacements. Des dispositifs de retransmission, tels que des tours cellulaires ou des stations de base, sont utilisés pour maintenir la connectivité et garantir une transmission de données fiable à mesure que les terminaux se déplacent entre différentes cellules. Ces dispositifs utilisent des techniques telles que le transfert et le saut de fréquence pour assurer une communication fluide, réduisant le besoin de retransmissions en raison de la perte de signal.

### 2.4 RESEAUX AD HOC :

Les réseaux ad hoc, ou réseaux mobiles ad hoc (MANETs), sont une innovation récente par rapport à leurs homologues filaires et cellulaires. L'idée de réseaux de communication décentralisés trouve ses racines dans les recherches des années 1960, axées sur la construction de systèmes résilients. Les années 1970 ont vu le développement de réseaux radio à paquets, démontrant la communication des appareils mobiles sans infrastructure fixe. Enfin, les années 1990, avec l'essor des ordinateurs personnels et des logiciels open source, ont mis en lumière le terme "ad hoc", reflétant la nature spontanée de ces réseaux. Bien qu'encore un concept jeune, les réseaux ad hoc offrent des possibilités passionnantes pour des situations où l'infrastructure



traditionnelle fait défaut. La recherche continue d'améliorer leurs capacités pour une application plus large.

Les réseaux ad hoc ont permis la communication dans des environnements dynamiques et décentralisés. Ces réseaux se caractérisent par leur absence d'infrastructure fixe et reposent sur la mobilité et la coopération des nœuds pour établir et maintenir les connexions.

### A) Caractéristiques :

**Auto-organisation** : Les appareils forment dynamiquement le réseau, utile pour des installations temporaires.

**Décentralisation** : Pas de point de contrôle unique, ce qui les rend potentiellement plus résilients face aux pannes.

**Inconvénients** : Évolutivité limitée, préoccupations de sécurité en raison de leur nature ouverte, performances potentiellement inférieures par rapport aux réseaux centralisés.

### B) Terminaux / retransmission :

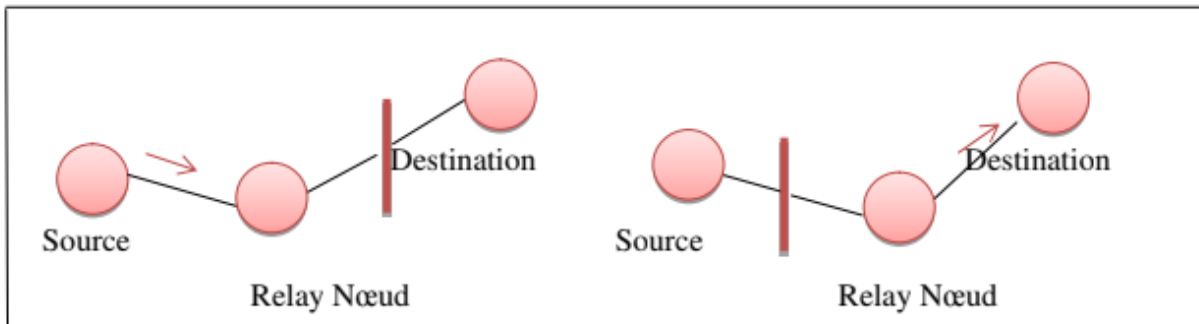
Dans les réseaux ad hoc, les terminaux sont des appareils mobiles qui forment un réseau temporaire pour communiquer entre eux. Des dispositifs de retransmission, tels que des routeurs ou des relais, sont utilisés pour transmettre des paquets de données entre les terminaux. Ces dispositifs jouent un rôle crucial dans le maintien de la connectivité et la garantie d'une transmission de données fiable dans des environnements dynamiques et décentralisés.

Contrairement aux réseaux traditionnels avec des points d'accès dédiés, les DTN (réseaux tolérants aux délais) fonctionnent de manière distribuée. Tout appareil capable de stocker et de transmettre des données, des ordinateurs portables et des smartphones aux drones et aux nœuds de capteurs, peut agir comme un terminal. Ces terminaux non seulement originent des données (comme les lectures de capteurs ou les messages) et reçoivent des données d'autres, mais les stockent temporairement lorsque la connexion directe vers la destination n'est pas disponible. Cette approche distribuée de la retransmission, où tout terminal peut agir comme relais pour transporter et transmettre des paquets de données vers le destinataire, est cruciale pour surmonter les défis de la connectivité intermittente inhérente aux DTN.

## 3. LES RESEAUX TOLERANTS AUX DELAIS DTN :

Les réseaux DTN désignent des réseaux globaux interconnectant des sous-réseaux régionaux conçu pour fonctionner efficacement sur des distances extrêmes telles que celles rencontrées dans les communications spatiales ou sur une échelle interplanétaire. Ce sont des environnements où les déconnexions sont fréquentes et la connectivité réseau peut être intermittente. Ils sont conçus pour résoudre les défis techniques rencontrés dans les réseaux hétérogènes.

Les réseaux DTN sont des réseaux capables de transmettre des informations de bout en bout, même lorsque le réseau n'est pas connecté en permanence. La figure ci-dessous représente un exemple de DTN



**Figure 1:** Transfert en utilisant un nœud intermédiaire

En fonction de la mobilité des nœuds, le nœud relais est connecté soit à la source soit à la destination mais pas aux deux simultanément. Ce qui fait, il n'y a pas de connexion de bout en bout.

## 4. CARACTÉRISTIQUES DES RÉSEAUX DTNS:

Les DTN présentent les caractéristiques suivantes [1] :

### 4.1 L'INCERTITUDE DU DELAI DE RESEAU :

La topologie du réseau dans les DTN est dynamique et le milieu de transmission est relativement particulier. Par conséquent, le délai de réseau est incertain. Par exemple, dans les communications interstellaires, le délai est généralement de plusieurs minutes [1].

### 4.2 CONNEXION INTERMITTENTE :

Les réseaux DTN sont sujets à des déconnexions fréquentes dues à divers facteurs, tels que les attaques sur les nœuds pendant les opérations militaires, les catastrophes naturelles dans les réseaux d'urgence, etc. Si aucun chemin de bout en bout n'existe entre la source et la destination, la communication traditionnelle utilisant les protocoles TCP/IP ne fonctionne pas. De nouveaux protocoles sont nécessaires pour prendre en charge les communications sans chemin de bout en bout. En fait, Pour parvenir à livrer les données, une modification de la pile protocolaire usuelle a été proposée. Cette dernière consiste en l'ajout d'une couche supplémentaire appelée couche Bundle, dont le rôle principal est le stockage des données

jusqu'à ce qu'une occasion de les transmettre se présente. Le concept utilisé ici fait référence au paradigme « Store and Forward » [1].

### **4.3 TEMPS D'ATTENTE IMPORTANT :**

Pour pallier les coupures fréquentes, les nœuds stockent les données pendant une durée variable et parfois très longue (heures ou jours) afin d'attendre une opportunité de transmission. Cela rend la communication difficilement prévisible [1].

### **4.4 DELAIS LONGS ET VARIABLES :**

En plus de la connexion intermittente, les longs délais de propagation entre les nœuds et les délais d'attente variables à chaque nœud contribuent à des retards de bout en bout qui peuvent rendre inopérants les protocoles et applications internet qui reposent sur un retour rapide [1].

### **4.5 DEBITS DE DONNEES ASYMETRIQUES :**

L'internet gère des asymétries modérées de débits de données bidirectionnels pour les utilisateurs disposant d'un accès par câble TV ou par ADSL asymétrique. Cependant, si ces asymétries sont importantes, les protocoles conversationnels ne fonctionneront pas.

### **4.6 TAUX D'ERREUR ELEVES :**

Les erreurs de bit sur les liens de transmission nécessitent la correction ou la retransmission de l'intégralité du paquet, ce qui peut entraîner un trafic réseau plus important. Pour un taux d'erreur de lien donné, la transmission hop-by-hop nécessite moins de retransmissions que la retransmission de bout en bout.

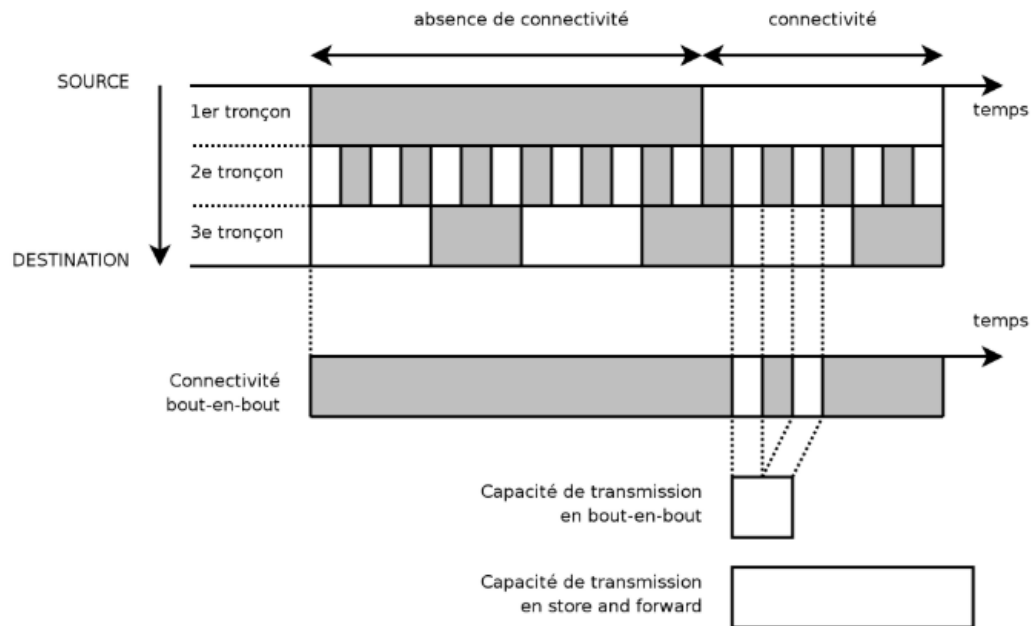
### **4.7 MULTIPLICITE DES PROTOCOLES :**

L'affluence d'une grande variété de protocoles de communication dans les DTN peut être une problématique à ne pas négliger [1].

## **5. CONCEPT DE BASE:**

Un relais ne peut se contenter de router les paquets. Il doit aussi pouvoir les stocker, et les transmettre seulement quand une opportunité de connexion apparaît. C'est pourquoi cette architecture repose sur une logique *store-and-forward*, similaire à celle utilisée par les services postaux : les données sont transmises d'une zone de stockage à une autre. Ainsi, selon des caractéristiques des tronçons traversés, il est possible de transmettre plus de données qu'avec un système de transmission de bout en bout, comme l'illustre la figure ci-dessous.

En effet, si on considère des capacités de stockage suffisantes à chacun des nœuds, la capacité de transmission du système *store and forward* est égale au minimum des bandes passantes moyennes des différents tronçons, indépendamment des instants de connectivité de chacun d'eux.



**Figure 2:** Comparaison des capacités de transmission d'un système « bout en bout » et d'un système « store and forward » [28]

## 6. ARCHITECTURE DES DTNS:

### 6.1 LA COUCHE BUNDLE :

Lors d'une communication entre un capteur sur Mars et une station de contrôle sur Terre, les environnements traversés sont très variés et nécessitent chacun un protocole adéquat. C'est pourquoi DTN introduit une couche réseau bundle. Cette couche se place directement en-dessous de la couche applicative et permet la mise en œuvre du réseau DTN au travers de deux mécanismes : le store-and-forward et la couche de convergence [24]. Cette couche facilite le stockage et le transfert des messages, également appelés **Bundle**, entre les nœuds du réseau. Ainsi, un seul protocole est utilisé à travers l'ensemble du réseau DTN, tandis que seuls les protocoles inférieurs sont spécifiques à l'environnement de communication de chaque région.

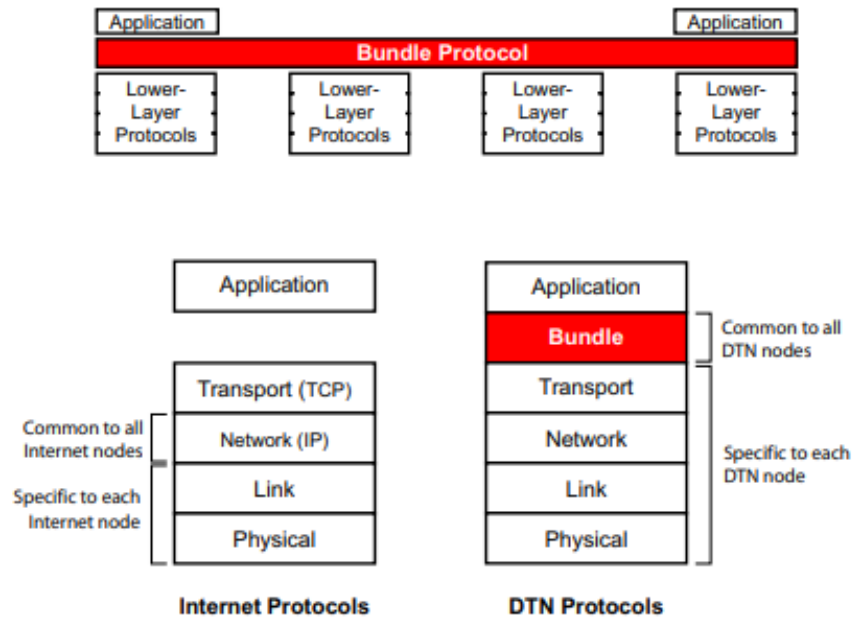


Figure 3: La couche bundle [25]

## 6.2 LA COUCHE DE CONVERGENCE :

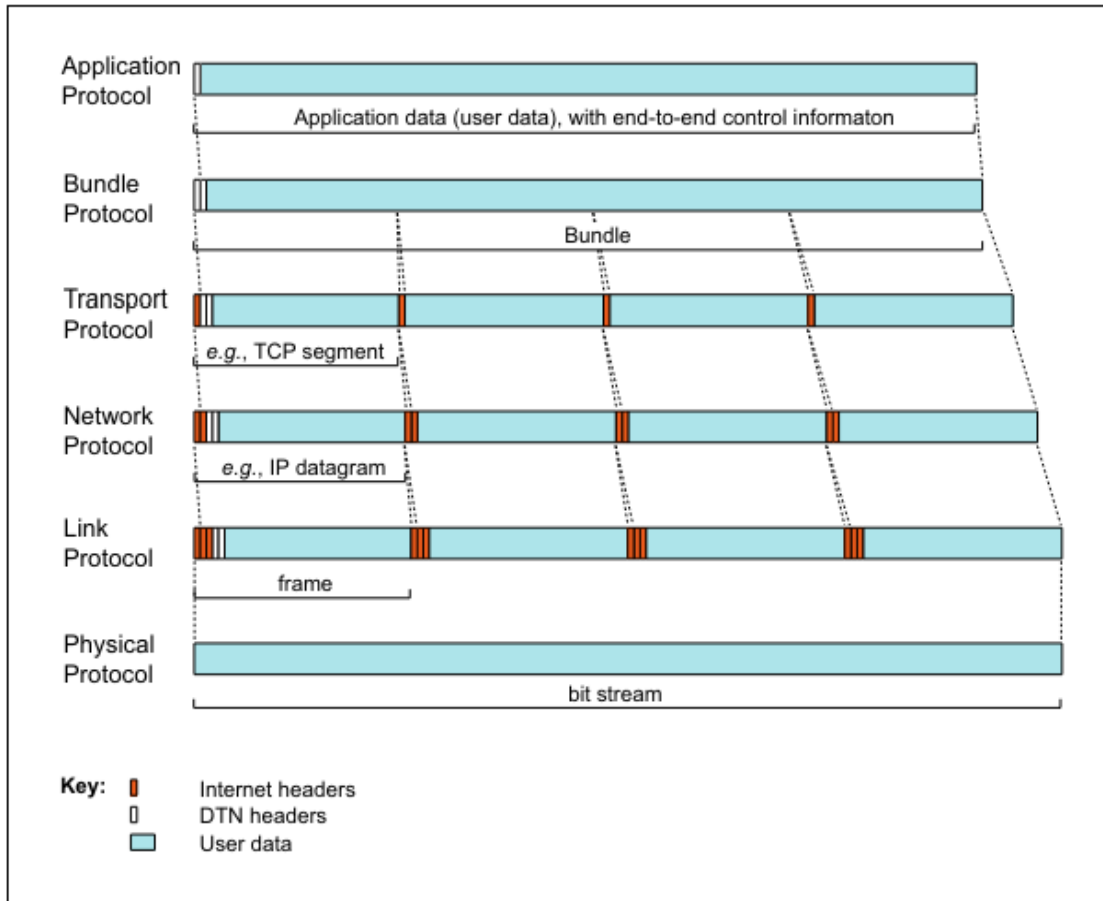
Le protocole bundle agit comme surcouche réseau et ne gère en aucune façon la transmission effective des bundles au nœud voisin. Pour cela, il utilise une couche de convergence ; celle-ci permet l'exploitation par le nœud DTN de la pile protocolaire sous-jacente (par exemple, TCP/IP). [24]

Cette couche de convergence permet d'assurer l'interconnexion des régions hétérogènes.

## 6.3 ENCAPSULATION DE BUNDLE :

Les Bundles étendent la hiérarchie de l'encapsulation des objets de données effectuée par les protocoles Internet. La figure ci-dessous montre comment fonctionne l'encapsulation des bundles dans le contexte des protocoles TCP/IP de couche inférieure. Le protocole Bundle ne modifie pas les données du protocole Internet ; il encapsule simplement les données du protocole applicatif.

Un agent de protocole Bundle peut fragmenter des bundles entiers en fragments (non illustré dans la figure ci-dessous), tout comme le protocole IP peut fragmenter des datagrammes entiers en fragments. Si des bundles sont fragmentés, l'agent de protocole Bundle à la destination les réassemble.



**Figure 4:** Encapsulation des Bundles dans les DTN [25]

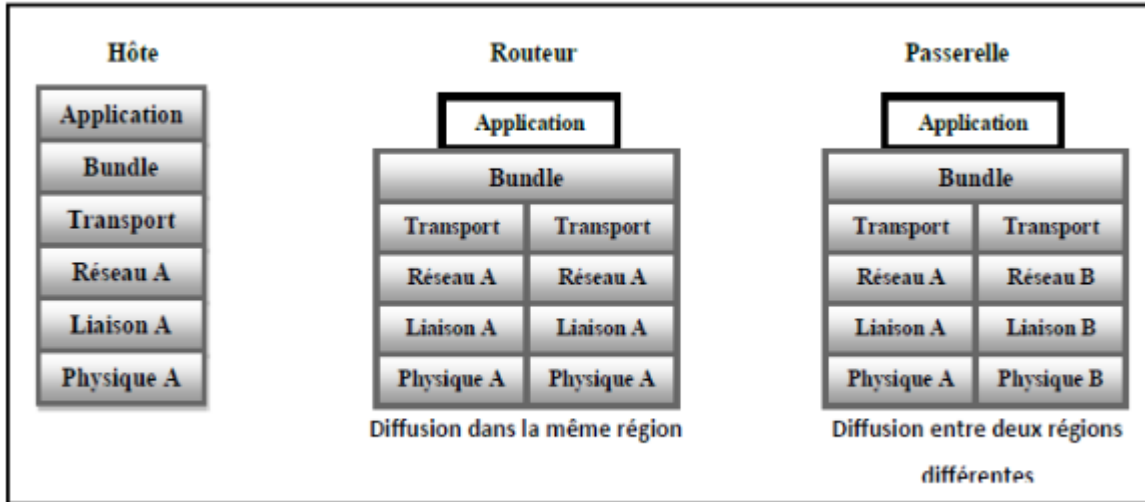
## 7. LES ENTITES DE COMMUNICATIONS:

### 7.1 LES NŒUDS DTN :

La mise en place d'un réseau DTN est effectuée par la définition des nœuds et des liaisons qui leur permettent de communiquer. [2]

Chaque nœud dispose d'un **EID (Endpoint IDentifier)** unique ainsi que d'un type parmi trois :

- **Host** : il s'agit des nœuds terminaux, capables de générer et d'absorber des bundles dans une application ;
- **Router** : nœud participant au routage des bundles à l'intérieur d'une région DTN ;
- **Gateway (Passerelle)** : participe au routage des bundles entre deux régions DTN différentes.



**Figure 5:** Les Différents rôles d'un nœud DTN [29]

**L'EID (Endpoint IDentifier)** reprend le principe des URIs pour former un identifiant unique pour les nœuds DTN. Il se présente sous la forme {ID de la région ; ID du nœud régional}. Chaque région a un ID unique, tout comme chaque nœud au sein de cette région. Il est possible que plusieurs nœuds DTN aient le même ID du nœud régional, tant qu'ils se trouvent dans des régions différentes.[2]

L'intérêt de cet adressage est sa résolution de la liaison tardive. Dans un réseau Internet, l'URI d'un objet est résolue en early binding (soit avant le début de la transmission) à l'aide d'un serveur DNS 13. Dans un réseau DTN, la résolution de l'EID est effectuée au fur et à mesure que l'on en a besoin. Par exemple, le Regional Node ID d'un nœud d'une région distante est résolu par la Gateway DTN à l'entrée de ladite région. Ce phénomène allège le réseau de toute communication concernant la résolution à distance et/ou la mise à jour des EID, ce qui est essentiel au bon fonctionnement de la couche Bundle en environnement difficile.

## 7.2 NOMMAGE ET ADRESSAGE DANS LES DTNS :

DTN est un réseau de réseaux où chaque réseau représente une région à l'intérieur de laquelle ont lieu des communications homogènes. Il est nécessaire donc de pouvoir identifier les nœuds, Afin de les identifier, le protocole bundle utilise des identifiants appelés **Endpoint ID**. Les EID sont composés de deux sous-parties dont la structure est (Identifiant de la région, Identifiant du nœud) :

- **Identifiant de la région :** Chaque région DTN a identifiant unique et connu, ou que l'on peut connaître parmi toutes les autres régions du DTN. Ainsi, un

référentiel pour l'ensemble des identifiants des régions est nécessaire, qui grâce à lui l'on peut retrouver le nom d'une région à tout moment.

Les bundles DTN (appelés aussi : messages) originaires de régions différentes de celle de destination sont transmis en premier lieu via des entités communicantes appelées : Gateway (Passerelles), qui connectent la région source a une ou plusieurs autres régions.

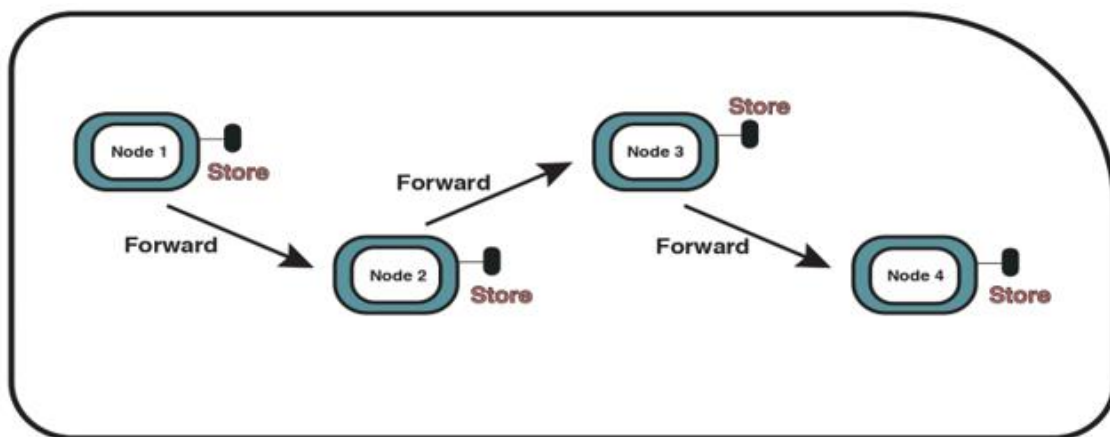
- **Identifiant du nœud** : L'identifiant du nœud est spécifique aux protocoles de la région, ce qui signifie qu'il n'est pas nécessairement unique en dehors de la région. Il est principalement utilisé pour le routage à l'intérieur de la région. La résolution de l'identifiant du nœud ne se fait pas au niveau de la source. Au lieu de cela, cette résolution intervient lorsque le message atteint la région cible, par la passerelle.

## 8. FONCTIONNEMENT D'UN DTN:

Le DTN résout tous les problèmes rencontrés par les protocoles de bout en bout, en fonctionnant sur une logique dites store-and-forward message switching.

### 8.1 PRINCIPE DU STORE-AND-FORWARD:

Les méthodes de *store and forward* sont utilisées dans la vie de tous les jours. On peut citer par exemple l'acheminement d'un courrier, d'un e-mail, d'un message vocal, etc. Pour cela, l'utilisation d'espace de stockage s'avère nécessaire. [25]



**Figure 6:** mechanism de Store and Forward



## Chapitre 1 : Généralités Sur Les DTNs

Contrairement aux réseaux traditionnels comme Internet qui utilisent des mémoires à court terme pour le routage des données, les réseaux DTN (Delay Tolerant Networks) s'appuient sur des espaces de stockage permanents, dits "stockage persistant". Cette caractéristique fondamentale s'avère indispensable pour répondre aux défis spécifiques des environnements DTN, souvent caractérisés par des connexions intermittentes, des délais importants et des taux d'erreur élevés.

Dans les réseaux DTN, l'utilisation de stockage persistant est indispensable pour plusieurs raisons :

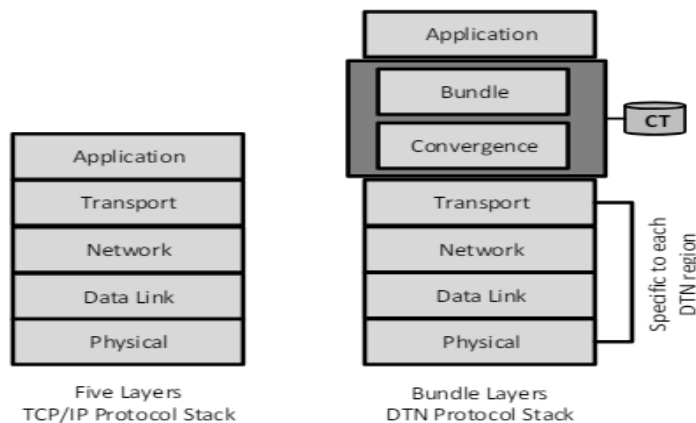
- Le lien de communication entre la source et la destination peut être indisponible pendant une période indéterminée.
- Certains nœuds du réseau peuvent émettre ou recevoir des données plus rapidement ou de manière plus fiable que d'autres.
- Un message transmis doit être retransmis en cas d'erreur sur le réseau ou si les informations ne sont pas acceptées pour être transférées.

Les données, tout ou partie, en provenance d'une application, sont déplacées d'un espace de stockage d'un nœud du réseau vers l'espace de stockage du nœud suivant tout au long d'un chemin qui permettra éventuellement de joindre le destinataire.

Lors du transfert de données (ou d'une partie de ces données) d'un nœud du réseau vers le suivant, la taille du message est annoncée afin de réserver l'espace de stockage nécessaire et la bande passante pour le transfert.

### 8.2 LE PROTOCOLE BUNDLE :

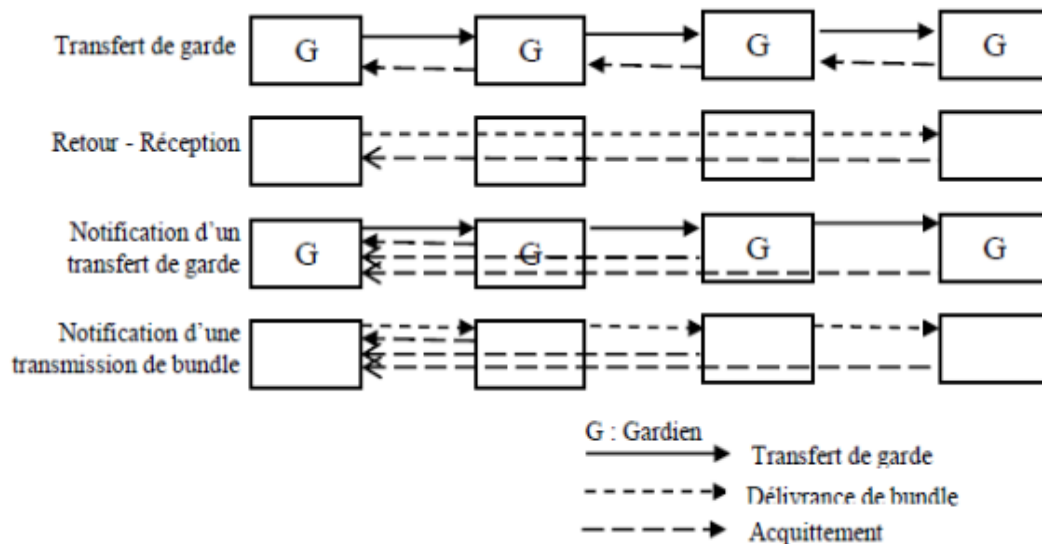
Le protocole **Bundle** est positionné entre la couche applicative et les couches spécifiques à chaque région. Dans le cadre de TCP/IP, il se place comme une couche supérieure à la couche transport.



**Figure 7:** Couches bundle comprenant le protocole bundle. [31]

Dans le contexte des réseaux DTN, où les transmissions de données peuvent s'étendre sur de longues distances et des durées importantes, le protocole Bundle adopte une approche différente de celle du protocole TCP pour optimiser les échanges. Il vise à limiter les allers-retours entre les nœuds. Ainsi, l'acquittement n'est pas obligatoire et dépend de la classe de service sélectionnée parmi les suivantes :

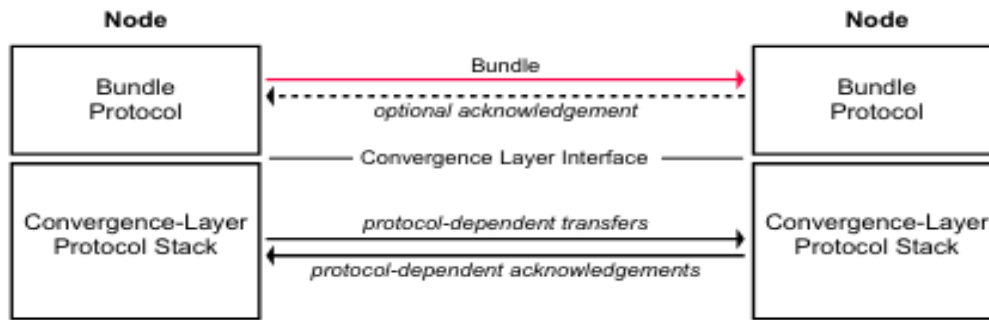
- Custody Transfer
- Return Receipt
- Custody-Transfer Notification
- Bundle-Forwarding Notification
- Priority of Delivery (en masse, normal, accélérée)
- Authentication (afin de vérifier l'identité de l'émetteur et pour vérifier l'intégralité du message)



**Figure 8:** Les options de livraisons offertes par la couche bundle.[29]

### 8.3 PROTOCOLE NON CONVERSATIONNEL :

Dans les réseaux avec des connexions intermittentes et des retards importants, les protocoles de conversation comme TCP peuvent être peu fiables en raison de leurs nombreux allers-retours. Les nœuds DTN préfèrent donc une communication basée sur des sessions simples, avec un minimum d'aller-retour. N'importe quelle information du nœud de réception est optionnelle selon la classe de service choisie. Le protocole de bundle, au-dessus de la couche de convergence, facilite les échanges de bundles. Bien que la couche de convergence puisse utiliser des protocoles de conversation comme TCP, des protocoles de bas niveau non conversationnels ou à conversation minimale sont souvent privilégiés pour les liens intermittents et les retards importants.[25]



**Figure 9:** Protocole non conversationnel [25]

## 9. FIABILITE DANS LES RESEAUX DTNS :

### 9.1 TRANSFERT DE GARDE :

La couche service du bundle dans les réseaux DTN (Delay Tolerant Networks) offre un certain nombre de fonctionnalités pour la livraison de messages. La fonction la plus basique est la livraison de messages unicast non acquittés et priorisés, bien que cette livraison ne soit pas garantie. Pour améliorer la fiabilité de la livraison, deux options sont proposées : les acquittements de bout en bout et le transfert de garde.

L'option de transfert de garde permet aux nœuds DTN d'agir en tant que **gardien**, ces gardiens sont les nœuds qui reçoivent les bundles en cours de route et qui acceptent d'assumer la responsabilité de la livraison fiable et de garantir le transfert fiable des données vers la destination.

Lorsque le gardien de la couche bundle courante doit transmettre un message à un autre nœud du réseau, celui-ci demande le transfert (**custody transfer**) afin d'envoyer le message considéré et met en place un délai de retransmission des données basé sur l'acquittement par le destinataire de ces données. Lorsque le nœud DTN accepte le transfert, il envoie un acquittement à l'émetteur l'informant que celui-ci a accepté le transfert du bundle et l'a reçu. Si aucun acquittement ne parvient à la source avant la fin du délai de retransmission, la source réémet le message en question. Le délai de retransmission des données peut être déterminé pour chaque routeur selon les informations de routage DTN ou décidé localement en fonction de l'expérience que le nœud source possède avec le nœud destinataire.

Le gardien doit conserver les données à transmettre jusqu'à ce que :

- L'obtention de l'acceptation de la garde par un autre nœud.
- Jusqu'à ce que la durée de vie fixée au bundle arrive à expiration, cette durée étant supérieure au délai de retransmission. Cependant, ce temps d'acquittement devrait être assez long, afin de permettre une transmission fiable.

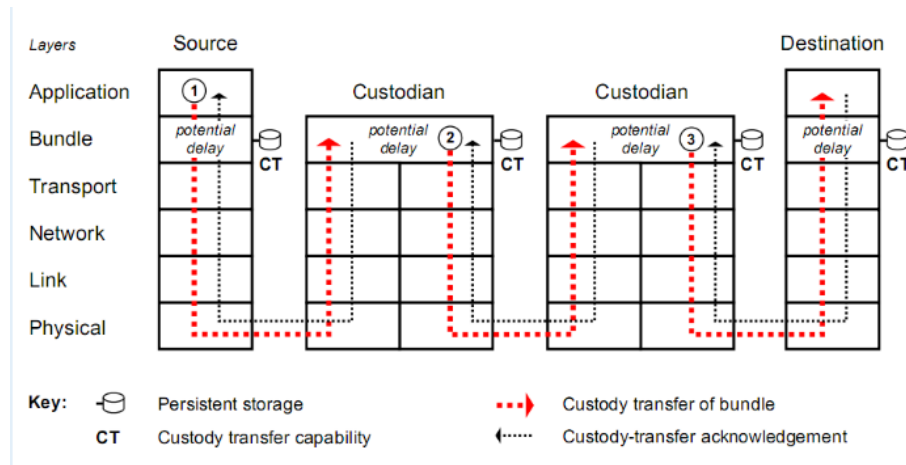


Figure 10: Transfert de garde [25]

## 9.2 APPROCHES DE FIABILITE :

- a) **Fiabilité Saut par Saut :** Se concentre sur l'assurance de la transmission réussie d'un message à travers une seule région (saut) sur son chemin vers la destination. Les passerelles positionnées aux frontières de ces régions agissent en tant que gardiens, prenant la responsabilité de la livraison fiable au sein de leur région assignée. Cependant, la fiabilité saut par saut ne fournit pas d'accusé de réception de bout en bout. Le nœud source ne reçoit qu'une confirmation que le prochain saut dans la file d'attente a reçu le message, sans garantie de son arrivée finale à la destination.
- b) **Accusé actif :** Alors que la fiabilité saut par saut offre un niveau de base d'assurance de livraison des messages, elle manque de la garantie cruciale que le message atteigne sa destination finale. Pour pallier cette limitation, le concept de réception active est introduit. Ici, après avoir reçu avec succès le message (M), le nœud de destination (U) envoie activement un accusé de réception (R) au nœud source (S). Cet accusé de réception fonctionne comme un nouveau message lui-même, se propageant "épidémiquement" à travers le réseau en étant transmis de nœud en nœud. Lorsque l'accusé de réception rencontre des nœuds conservant toujours le message original (M), il agit comme un remède, les incitant à arrêter leurs tentatives de transmission. Cette approche fournit la fiabilité désirée de bout en bout, mais elle s'accompagne d'une augmentation des frais généraux du réseau en raison du trafic supplémentaire généré par la propagation des accusés de réception (R).
- c) **Accusé passif :** S'appuyant sur le concept d'accusés de réception actifs, qui offrent une fiabilité de bout en bout mais augmentent les frais généraux du réseau, nous rencontrons la réception passive. Cette approche vise à atteindre une fiabilité similaire avec un coût moindre. Au lieu de faire en sorte que la destination envoie activement un accusé de réception à la source, la réception passive utilise un "message de mise à mort" implicite (K). Ce message est uniquement envoyé par les nœuds guéris (ceux qui ont reçu le message et n'ont plus besoin de le transmettre) lorsqu'ils rencontrent des nœuds infectés (qui conservent toujours le message

original M). Essentiellement, K agit comme un signal ciblé pour arrêter les tentatives de transmission du nœud infecté. Bien que la réception passive atteigne une fiabilité de bout en bout avec des frais généraux moindres, il y a des compromis. Le nœud source reçoit la confirmation (accusé de réception) plus lentement en raison de la nature passive des messages de mise à mort (K) qui se propagent à travers le réseau. De plus, il y a une probabilité plus élevée que les nœuds infectés continuent à transmettre M pendant une courte période même après que la source a reçu un accusé de réception, car les messages Ks peuvent ne pas les avoir encore atteints.

- d) **Accusé de Réception du Réseau Ponté (Passerelle réseau) :** Le concept repose sur l'utilisation d'un réseau DTN pour acheminer le message de la source à la destination, en complément du réseau cellulaire. Alors que ce dernier ne dispose pas de la bande passante nécessaire pour transmettre de grandes quantités de données, il peut être utilisé pour transmettre des paramètres légers. Ainsi, ce réseau cellulaire est uniquement employé pour transmettre un accusé de réception de bout en bout de la destination vers la source [3].

### 9.3 CONGESTION DANS LES RESEAUX DTNS :

Contrairement à la congestion sur Internet, où les paquets sont perdus parce qu'il n'y a pas assez de bande passante de transmission pour les faire avancer tous, la congestion dans un réseau DTN se compose de paquets perdus parce qu'il n'y a pas assez de mémoire pour les stocker en attendant une opportunité de transmission.

**Qu'est-ce que la congestion dans les DTN ? :** La congestion dans un réseau DTN se traduira par un stockage indisponible sur les nœuds DTN pour les transferts de messages. Les techniques visant à éviter et à contrôler la congestion se manifestent dans la formulation du problème de routage sous forme de contraintes de stockage [4].

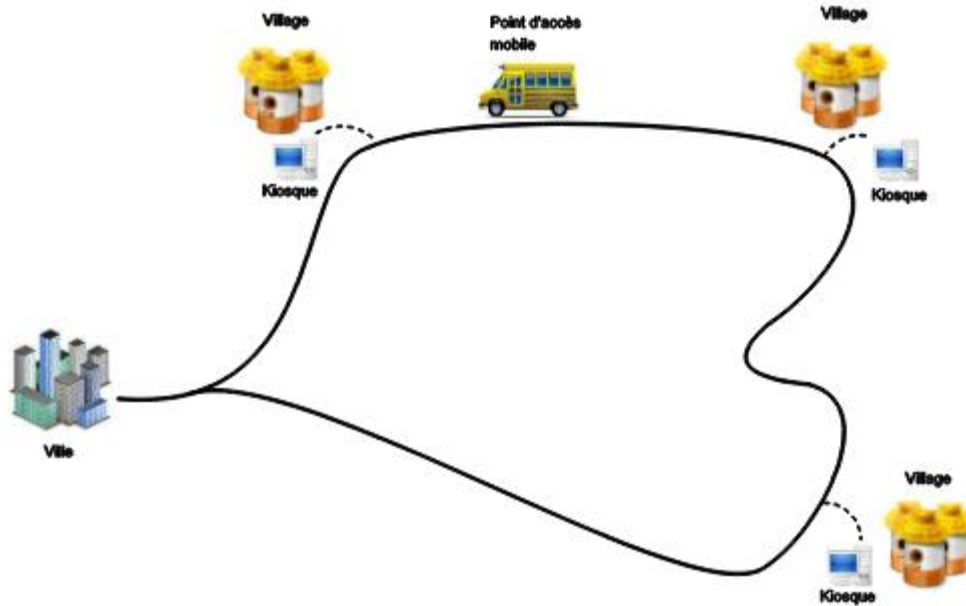
**Le contrôle de congestion :** concerne l'allocation des ressources dans un réseau de manière à ce que celui-ci puisse fonctionner à un niveau de performance acceptable lorsque la demande dépasse ou est proche de la capacité des ressources du réseau. Ces ressources comprennent les débits des liens, l'espace tampon (mémoire) et la capacité de traitement aux nœuds intermédiaires. La congestion se produit lorsque la demande est supérieure aux ressources disponibles [5].

**Le contrôle de flux :** Dans les réseaux tolérants aux délais (DTN), le contrôle de flux opère au sein de la couche de bundle pour gérer les débits de transmission de données. Ce mécanisme garantit que le nœud émetteur n'envoie pas une quantité de données dépassant les capacités de traitement ou de stockage du nœud récepteur. [32]

## 10. APPLICATIONS DES RESEAUX TOLERANTS AUX DELAIS :

Dans les réseaux tolérants aux délais, nous pouvons distinguer trois grandes familles d'applications : [1]

- **Applications spatiales :** Les besoins de communication dans l'espace et les défis associés, tels que les distances, les délais, la vitesse et la mobilité, ont conduit au développement des réseaux tolérants aux retards. En 2008, la NASA a réalisé des tests sur les DTN pour les communications spatiales. Ces tests impliquaient l'envoi d'un message d'une sonde spatiale équipée du protocole de bundle vers la Terre, relayé par neuf nœuds intermédiaires via un réseau DTN. Les résultats de ces tests ont été très positifs, démontrant l'efficacité des DTN dans ce contexte de communication. Cependant, les travaux dans ce domaine restent encore expérimentaux.
- **Applications militaires :** Les forces armées américaines, notamment la DARPA, suivent de près les progrès réalisés dans le domaine des réseaux tolérants aux délais. Sur le terrain, les communications entre les soldats et les bases militaires sont souvent sujettes à des perturbations, voire des interruptions, en raison de la mobilité et des interférences telles que le brouillage. Dans des situations de danger extrême pour les soldats déployés pour des missions risquées, l'utilisation de cette technologie peut être justifiée.
- **Applications biologiques :** Dans le domaine de la biologie, plusieurs projets utilisent des réseaux de capteurs pour le suivi d'espèces animales.
  - (a) **ZebraNet :** Ce projet de recherche se penche sur le comportement des zèbres qui portent des colliers équipés de systèmes GPS. Les données sont transférées automatiquement dès qu'un véhicule passe à proximité. L'application enregistre les données GPS toutes les trois minutes, et l'expérience se poursuit pendant une année sans intervention humaine. Les biologistes explorent ainsi les conséquences de l'interaction entre les espèces animales et les activités humaines.
  - (b) **DakNet :** est un projet visant à résoudre les difficultés financières liées à l'installation de câbles téléphoniques dans des villages en Inde, au Rwanda, au Cambodge, au Paraguay, et dans d'autres régions similaires, afin de faciliter la communication avec le reste du monde. Cette solution sans fil ad-hoc abordable repose sur l'équipement de bus et de motos avec des dispositifs Wi-Fi, permettant ainsi la collecte et la distribution de courriels et de messages vidéo entre les villages.



**Figure 11:** Concept DakNet [1]

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons fourni un état de l'art sur les réseaux tolérants aux délais (DTN). Nous avons introduit la notion de DTN, en expliquant le contexte de leur émergence et leur fonctionnement, notamment à travers les techniques de store-and-forward et de transfert de garde. De plus, nous avons décrit l'architecture de ces réseaux, caractérisée par l'ajout d'une couche supplémentaire, la couche bundle, située au-dessus de la couche transport. Le principe de routage dans ces réseaux sera abordé dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 2 : ROUTAGE DANS LES DTNS



## Routage dans les DTNs

### 1. INTRODUCTION:

Dans le domaine des réseaux tolérants aux retards (DTN), le routage représente une composante essentielle pour assurer la communication efficace entre les nœuds dans un environnement où la connectivité est intermittente et imprévisible. Ce chapitre explore les différentes étapes et stratégies impliquées dans le processus de routage au sein des DTN, soulignant l'importance de chaque phase pour garantir une transmission fiable des données.

Nous commencerons par examiner les étapes fondamentales du routage dans les DTN. Ensuite, nous passerons en revue les types de routage couramment utilisés dans les DTN, nous aborderons également les défis inhérents au routage dans les DTN. Enfin, ce chapitre présentera les modèles de mobilité couramment utilisés pour simuler les déplacements des nœuds dans les DTN, et une classification pour quelques protocoles proposés de routage dans les DTNs

En synthétisant ces concepts, ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie des mécanismes de routage dans les DTN.

### 2. ÉTAPES DE ROUTAGE:

Le fonctionnement du routage DTN se déroule approximativement selon les étapes suivantes [5]:

**A. Découverte de voisins :** Les nœuds doivent se découvrir mutuellement avant qu'une opportunité de transfert puisse être établie ; de plus, les nœuds ne savent pas quand la prochaine opportunité se présentera.

**B. Transfert de métadonnées :** Des informations sur la gestion des tampons et les décisions de routage sont échangées entre les nœuds après leur rencontre.

**C. Transfert de données :** Une fois les étapes précédentes franchies, le transfert de données peut commencer. La quantité de données qu'un nœud peut transférer est limitée et un nœud peut sortir de la portée de communication avant la fin de la transmission des données. Une façon de gérer cette situation consiste à fragmenter le paquet de données avant de le transmettre (fragmentation proactive), ou à fragmenter les données en paquets lorsque la transmission des données n'est pas complètement terminée (fragmentation réactive).

**D. Gestion du stockage :** Lorsque des paquets sont reçus entre des nœuds voisins, chaque nœud doit gérer son tampon local de taille finie en sélectionnant un ordre de suppression particulier des paquets qui doivent être abandonnés afin de libérer de l'espace pour les paquets entrants. Pour abandonner un paquet, il utilise certains indices tels que l'heure de réception du paquet, le temps restant des messages, la distance par rapport à la destination.

### **3. TYPES DE ROUTAGE DANS LES DTN**

Les réseaux tolérants aux retards (DTN) englobent différents types de réseaux aux caractéristiques distinctes en raison de leur connectivité intermittente. Pour relever les défis de routage dans les DTN, plusieurs systèmes de classification des protocoles ont été proposés.

#### **3.1 ROUTAGE PROACTIF ET ROUTAGE REACTIF**

Le protocole de routage idéal se distingue dans plusieurs domaines clés : il garantit la livraison des messages avec une probabilité élevée, minimise les retards de livraison et préserve l'énergie. D'une manière générale, ces protocoles se classent en deux catégories principales : proactifs et réactifs.

##### **3.1.1 Routage proactif**

Les algorithmes de routage proactif adoptent une approche préemptive, calculant en permanence des chemins de transfert sans qu'un trafic ne soit nécessaire pour lancer le processus. Ces schémas basés sur la connaissance supposent que tous les nœuds soient informés de la disposition globale du réseau et de son évolution dans le temps. Les décisions sont prises en utilisant des informations centralisées sur l'ensemble du réseau mobile, souvent collectées hors ligne au préalable.

Les protocoles de réseau proactifs exploitent ces données de routage précalculées pour maintenir une image complète de la topologie du réseau à tout moment. Les nœuds diffusent périodiquement des balises signalant leur disponibilité et la qualité de leur connexion aux appareils à proximité. Cette approche permet une faible latence (livraison rapide des messages) mais peut vider considérablement la batterie en raison de la communication constante [7].

##### **3.1.2 Routage réactif**

Les algorithmes de routage réactifs découvrent les routes disponibles à la demande, lorsque le trafic doit être acheminé vers une destination inconnue. Les schémas de routage réactif dépendent de la capacité à utiliser les informations de contact collectées (historique des contacts) dans chaque nœud de transfert, sans connaissance prédéterminée des connexions futures.

Le processus de découverte de chemin ne s'exécute pas vers un nœud particulier tant qu'il ne commence pas à envoyer le processus vers un autre nœud. Les informations topologiques ne sont échangées que lorsque cela est nécessaire, ce qui permet d'économiser de l'énergie. Cependant, leur latence est considérée comme l'un des inconvénients des protocoles réactifs car les routes sont découvertes à la demande. Par conséquent, la transmission sur des routes inconnues ou expirées connaît des retards importants, que le

protocole de routage ou l'application doit prendre en compte en stockant temporairement ou en abandonnant les données [7].

### **3.2 ROUTAGE DETERMINISTE ET STOCHASTIQUE**

Les méthodes de routage se classent généralement en deux catégories selon la capacité de prédire le mouvement des appareils. Les approches déterministes supposent une connaissance parfaite des emplacements futurs des appareils et des possibilités de communication. À l'inverse, les mécanismes de routage stochastique sont utilisés lorsque le mouvement des appareils est imprévisible, aléatoire ou suit une probabilité statistique.

### **3.3 ROUTAGE PAR SOURCE ET ROUTAGE PAR SAUT**

Du point de vue des propriétés, deux familles distinctes de classification du transfert de paquets sont utilisées pour trouver la destination : le routage par source et le routage par saut.

#### **3.3.1 Routage par Source**

Dans le routage par source, qui est une technique simple parfois utilisée en amont, le chemin complet emprunté par un message est déterminé à la source et inclus dans l'en-tête du paquet. Cela crée une route fixe basée sur la disposition du réseau, et le chemin reste inchangé pendant que le message voyage. Cependant, à mesure que le message se rapproche de sa destination, les nœuds intermédiaires peuvent posséder des informations plus récentes sur la meilleure connexion [8].

#### **3.3.2 Routage par Saut**

À la différence du routage par source, le routage par saut exploite les informations dynamiques du réseau. Chaque nœud le long du chemin peut prendre des décisions de transfert en fonction de sa connaissance en temps réel des contacts locaux et des files d'attente, ce qui donne accès à des informations plus récentes indisponibles à la source. Cette flexibilité permet au routage par saut de surpasser potentiellement le routage par source en termes d'efficacité [9].

## 4. DEFIS DE ROUTAGE DANS LES DTN

### 1. Connectivité intermittente :

La connectivité intermittente est un problème important dans les DTN, car les nœuds se déconnectent fréquemment, ce qui entraîne des partitions du réseau. Le défi consiste à concevoir des protocoles de routage capables de gérer ces déconnexions fréquentes tout en garantissant la distribution des messages. Les protocoles doivent être robustes et capables de gérer la nature dynamique et fragmentée du réseau.

### 2. Délais variables et longs :

Les DTN connaissent souvent des délais longs et imprévisibles en raison de la disponibilité intermittente des chemins de communication. Cette variabilité pose un défi aux stratégies de routage, qui doivent être capables de tolérer et de s'adapter aux conditions de retard fluctuantes pour garantir la distribution des messages en temps opportun, malgré l'incertitude inhérente.

### 3. Information réseau limitée :

Dans les DTN, les nœuds fonctionnent généralement avec des informations limitées ou obsolètes sur la topologie du réseau en raison de sa nature dynamique. Cela pose un défi aux protocoles de routage, qui doivent prendre des décisions de transfert efficaces en se basant sur des données incomplètes ou obsolètes, afin d'assurer une distribution efficace et fiable des messages.

### 4. Contraintes de ressources :

Les nœuds des DTN sont souvent confrontés à des restrictions en termes d'énergie, d'espace de stockage et de puissance de traitement. Le défi consiste à concevoir des protocoles de routage économes en énergie et sensibles aux ressources, optimisant l'utilisation de ressources limitées pour prolonger la durée de vie opérationnelle des nœuds individuels et du réseau dans son ensemble.

#### a. Espace de tampon :

En raison de la connectivité intermittente, les messages doivent être mis en mémoire tampon pendant de longues périodes et le nœud suivant dans la communication nécessite un espace de tampon suffisant pour stocker tous les messages en attente de futures opportunités de communication. Par conséquent, les nœuds intermédiaires ont besoin d'un espace de tampon suffisant pour stocker tous les messages en attente en fonction des opportunités.

#### b. Énergie :

Dans les DTN, en raison de la mobilité des nœuds, l'énergie de ces derniers se gaspille, ce qui conduit à un faible niveau d'énergie. Lors de l'envoi, de la réception et du stockage des messages, les nœuds ont besoin d'une énergie suffisante. Par

conséquent, la conception de protocoles de routage économes en énergie est l'un des défis des DTN.

**c. Puissance de traitement :**

L'un des objectifs des réseaux tolérants aux retards est de connecter des appareils qui dépassent les limitations des réseaux traditionnels. Ces appareils peuvent être minuscules avec une faible capacité de traitement, un CPU et une mémoire limités. Ces nœuds ne fonctionneront pas avec les mêmes protocoles de routage en raison de la consommation d'énergie.

## **5. MODELES DE MOBILITES POUR LES DTN**

### **5.1 RANDOM MOBILITY MODELS :**

Ces modèles représentent la forme la plus simple de mouvement de nœud, en se concentrant sur le caractère aléatoire :

#### **5.1.1 Random Walk:**

C'est une approche courante, bien que simple, pour simuler le mouvement des nœuds dans les réseaux tolérants aux retards (DTN). Dans ce modèle, les nœuds errent essentiellement dans l'espace de simulation sans objectif précis. À chaque pas de temps, ils choisissent une direction aléatoire et se déplacent sur une distance définie, créant un chemin qui semble erratique et imprévisible. La simplicité de ce modèle le rend facile à implémenter et efficace sur le plan du calcul. Cependant, ses modèles de mouvement irréalistes, sans destinations, pauses ou chemins spécifiques, limitent sa précision pour refléter des scénarios du monde réel [10].

#### **5.1.2 Random Waypoint (RWP) :**

Ce modèle fait un pas en avant par rapport au modèle Random Walk dans la simulation du mouvement des nœuds au sein des réseaux tolérants aux retards (DTN). Il propose une approche plus structurée par rapport à l'errance erratique de Random Walk. Voici son fonctionnement : les nœuds choisissent des destinations aléatoires (waypoints) dans l'espace de simulation, se déplacent vers elles en ligne droite à une vitesse constante, puis marquent une pause d'une durée définie en atteignant le waypoint. Ce cycle de choix d'un nouveau waypoint, de déplacement et de pause se poursuit tout au long de la simulation. Bien que le modèle RWP offre plus de structure en introduisant des destinations et des pauses, il présente encore des limitations. Les nœuds se déplacent de manière simpliste, en ligne droite, sans tenir compte des virages, des obstacles ou des

variations de vitesse, ce qui le rend moins réaliste que certains scénarios. De plus, les nœuds situés près des bordures de la simulation peuvent présenter un comportement irréaliste de sélection de waypoint en raison d'effets de bord [11].

### **5.2 GEOGRAPHIC MOBILITY MODELS:**

Ces modèles prennent en compte les contraintes géographiques et représentent le mouvement des nœuds à l'intérieur de zones spécifiques.

#### **5.2.1 Grid Model**

**Le modèle de grille :** Contrairement aux modèles plus simples qui considèrent l'espace comme uniforme, le modèle de grille le divise en une structure en grille, qu'il s'agisse d'une grille bidimensionnelle ou même tridimensionnelle selon les besoins de la simulation. Les nœuds résident dans des cellules spécifiques et peuvent se déplacer vers des cellules voisines selon des règles prédéfinies. Ces règles peuvent impliquer un mouvement aléatoire à l'intérieur d'une cellule, un mouvement directionnel vers des cellules voisines spécifiques imitant des routes, ou même des probabilités de transition attribuées entre les cellules, reflétant la probabilité d'emprunter certains chemins.

Le modèle de grille offre des avantages. Il fournit un moyen structuré et efficace de simuler le mouvement par rapport aux modèles aléatoires, permettant une mobilité contrôlée dans des zones définies. Il est également particulièrement utile pour simuler des environnements urbains avec des réseaux routiers bien définis [12].

#### **5.2.2 Geographic Trace Models**

Les modèles de traces géographiques (MTG) constituent une approche puissante au sein des modèles de mobilité géographique utilisés dans les réseaux tolérants aux retards (DTN) pour simuler le mouvement des nœuds avec un réalisme exceptionnel. Contrairement à la structure prédéfinie du modèle de grille, les MTG exploitent des données de mouvement réelles pour créer une représentation plus précise des modèles de mouvement des nœuds dans une zone géographique spécifique. Ces données peuvent provenir de diverses sources : GPS, traces de données cellulaires et réseau, simulations de flux de trafic.

Les MTG offrent la représentation la plus réaliste des modèles de mouvement des nœuds par rapport aux autres modèles. En incorporant des données du monde réel, ils capturent la complexité des déplacements humains, la circulation et d'autres facteurs influençant les rencontres de nœuds dans un lieu spécifique. Les MTG permettent aux chercheurs de se concentrer sur des zones géographiques précises où des données réelles sont disponibles. Cela peut être précieux pour évaluer les performances des DTN dans des

scénarios tels que les efforts d'intervention en cas de catastrophe dans une région spécifique ou l'étude de la distribution de messages dans une ville particulière [13].

### **5.3 SOCIAL MOBILITY MODELS :**

Ces modèles intègrent les aspects sociaux et le comportement de groupe dans le mouvement des nœuds.

#### **5.3.1 Community-Based Model**

Les modèles basés sur la communauté (MBC) dans les réseaux tolérants aux retards (DTN) ajoutent une dimension sociale aux simulations de mouvement des nœuds. Contrairement aux modèles de mouvement aléatoire, les MBC considèrent que les nœuds peuvent appartenir à des groupes partageant des destinations ou des modèles de mouvement communs, comme des équipes d'intervention en cas de catastrophe se déplaçant ensemble. Les nœuds au sein d'une communauté présentent un mouvement reflétant le comportement du groupe, tandis que des interactions entre les communautés peuvent également se produire. Cet aspect social offre un réalisme accru, en particulier pour les scénarios impliquant des interactions sociales ou des mouvements coordonnés. Cependant, les MBC peuvent être plus complexes à mettre en œuvre en raison de la nécessité de modéliser la dynamique de groupe et peuvent nécessiter des données supplémentaires sur les connexions entre les nœuds ou les affiliations de groupe [14].

#### **5.3.2 Human Mobility Models**

Les modèles de mobilité humaine (MMH) constituent une approche sophistiquée au sein des modèles de mobilité sociale utilisés dans les réseaux tolérants aux retards (DTN) pour simuler des modèles de mouvement de nœuds qui ressemblent étroitement au comportement humain réel. Les MMH vont au-delà des regroupements sociaux de base et tentent de capturer les caractéristiques statistiques des modèles de mouvement humain observés dans le monde réel. Ceci est réalisé en analysant de grands ensembles de données de mobilité humaine. L'analyse statistique des données collectées révèle des modèles de mouvement humain, tels que la fréquence et la durée des déplacements. Sur la base des modèles identifiés, des modèles mathématiques sont créés pour simuler un mouvement humain réaliste au sein de la simulation DTN. Les MMH offrent la représentation la plus réaliste des modèles de mouvement humain par rapport aux autres modèles de mobilité dans les DTN. Cela permet une évaluation plus précise des protocoles de routage dans des conditions réelles [14].

## 6. PROTOCOLS DE ROUTAGE DANS LES DTNS :

Dans la littérature sur DTN, les protocoles de routage sont classés en deux grandes catégories :

- Flooding Based
- Forwarding Based

### a) Flooding-Based Routing

Cette stratégie de routage peut être adoptée même lorsque les nœuds ne connaissent pas le réseau. Dans ce cas, un algorithme de routage épidémique est choisi, dans lequel le nœud source réplique le message à chaque nœud qu'il rencontre. Le routage basé sur la réplication peut donner des résultats comparativement meilleurs, mais il consomme plus de ressources réseau car pour qu'un seul message soit délivré, l'ensemble du réseau pourrait contenir autant de copies de ce message. Le routage par inondation est ensuite classé en deux types [15]:

- **Basé sur la réplication** : Le routage basé sur la réplication permet aux nœuds du réseau de créer des répliques du message reçu. Le nombre maximum de répliques générées dans un réseau pour un message particulier peut être  $n-1$ , où  $n$  représente le nombre de nœuds dans le réseau.
- **Basé sur un quota** : Dans le routage basé sur un quota, chaque message se voit attribuer un quota fixe, c'est-à-dire que le nombre de répliques pour un message particulier est limité

### b) Forwarding-Based Routing

Ce type de routage intervient lorsque les nœuds possèdent des connaissances pertinentes sur les autres nœuds du réseau. Dans ce type de routage, aucun nœud ne génère de répliqués des messages. Chaque nœud recherche les nœuds relais les plus appropriés et leur transmet le message. Cette approche permet de réduire la consommation excessive de ressources car la réplication des messages n'est pas autorisée. Ce type de routage est utilisé lorsque les ressources sont limitées [16].

## 6.1 EPIDEMIC

Le protocole de routage épidémique est un protocole de routage sans infrastructure, ce qui signifie qu'il n'a pas besoin d'une infrastructure réseau centrale pour fonctionner. Cela le rend idéal pour les réseaux déconnectés ou intermittents, tels que les réseaux de capteurs sans fil ou les réseaux mobiles ad hoc.



## Chapitre 2 : Routage Dans Les DTNs

Le principe du protocole de routage épidémique est simple : chaque nœud du réseau stocke une copie de tous les messages qu'il rencontre. Lorsqu'un nœud rencontre un autre nœud, il lui envoie toutes les copies de messages qu'il n'a pas déjà reçues. Ce processus se répète jusqu'à ce que tous les nœuds du réseau aient reçu tous les messages.

De cette manière, les données se propagent dans tout le réseau, même s'il n'y a pas de chemin direct entre le nœud émetteur et le nœud destinataire.

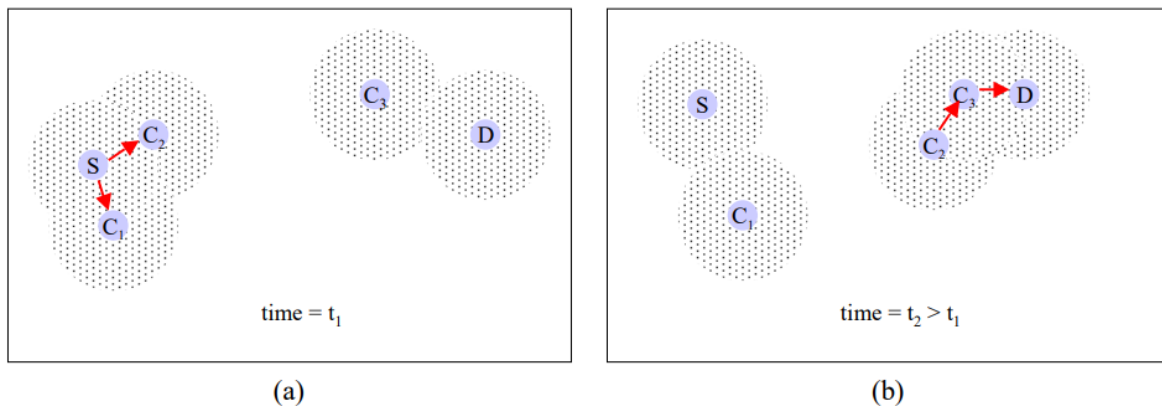
Le protocole de routage épidémique est également très robuste, car il ne dépend pas d'un seul nœud pour acheminer les messages. Si un nœud tombe en panne, les autres nœuds peuvent toujours acheminer les messages les uns aux autres.

Cependant, le protocole de routage épidémique peut également être inefficace, car il peut générer beaucoup de trafic réseau inutile. En effet, chaque nœud envoie tous les messages qu'il stocke à chaque nœud qu'il rencontre, même si ce nœud a déjà reçu certains de ces messages.

De plus, le protocole de routage épidémique peut ne pas être évolutif, car il peut devenir difficile de gérer un grand nombre de nœuds dans le réseau.

Malgré ses limitations, le protocole de routage épidémique est un protocole simple, robuste et efficace qui peut être utile dans une variété de situations [17].

La Figure 12 représente le Routage Épidémique de manière générale, avec des nœuds mobiles représentés par des cercles sombres et leur portée de communication sans fil montrée comme un cercle en pointillé s'étendant depuis la source.



**Figure 12:** Principe de Protocol Epidemique [17]

La figure 12(a) illustre le scénario où une source, S, souhaite envoyer un message à une destination, D, mais aucun chemin connecté n'est disponible entre S et D. S transmet alors ses messages à ses deux voisins, C1 et C2, à portée de communication directe. Plus tard, comme le montre la figure 12(b), C2 entre en communication directe avec un autre hôte, C3, et lui transmet le message. C3 étant à portée directe de D, il envoie finalement le message à sa destination.

### 6.2 PROPHET

Le protocole PROPHET (Predictive Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity) est un protocole de routage conçu pour les réseaux tolérants aux délais (DTN). Il fonctionne en maintenant et en utilisant un historique des rencontres passées entre les nœuds pour prendre des décisions de transfert. Voici comment fonctionne le protocole PROPHET :

Chaque nœud dans le réseau maintient un historique des rencontres avec d'autres nœuds. Cet historique comprend des informations telles que le moment de la rencontre, la durée de la rencontre, et éventuellement d'autres informations contextuelles.

Sur la base de l'historique des rencontres, chaque nœud calcule la prédictibilité de la livraison pour la transmission des messages vers d'autres nœuds dans le réseau.

La prédictibilité de la livraison représente la probabilité qu'un message transmis à un nœud spécifique atteindra finalement sa destination prévue en fonction des schémas de rencontres passées.

En plus des rencontres directes, PROPHET prend en compte la transitivité dans le transfert des messages. La transitivité se réfère à la probabilité qu'un nœud rencontre un autre nœud en fonction de leurs histoires de rencontres respectives avec des intermédiaires communs.

Par exemple, si le nœud A rencontré fréquemment le nœud B, et que le nœud B rencontre fréquemment le nœud C, alors il est plus probable que le nœud A rencontre le nœud C à l'avenir, même s'ils ne se sont pas directement rencontrés auparavant.

Lorsqu'un nœud reçoit un message destiné à être livré à un autre nœud, il consulte ses informations de prédictibilité de livraison pour des candidats potentiels de transfert.

Les nœuds avec des scores de prédictibilité de livraison plus élevés sont prioritaires en tant que candidats de transfert.

Si aucun candidat de transfert hautement prévisible n'est disponible, PROPHET peut recourir à un transfert probabiliste basé sur l'historique des rencontres et la transitivité.

PROPHET met périodiquement à jour l'historique des rencontres et les informations de prédictibilité de livraison en fonction des rencontres en cours et des échanges de messages.

Le mécanisme de mise à jour garantit que les décisions de routage restent adaptatives aux changements dans la topologie du réseau et aux schémas de rencontres au fil du temps.

PROPHET peut utiliser diverses métriques de performance pour évaluer l'efficacité du transfert de messages, telles que la probabilité de livraison, la latence de livraison et le sur débit des messages.

Ces métriques aident à optimiser les décisions de routage et à adapter les paramètres du protocole pour obtenir de meilleures performances globales dans les DTN.

En résumé, le protocole PROPHET vise à exploiter les informations historiques sur les rencontres et la transitivité pour prendre des décisions de routage informées, améliorant ainsi l'efficacité de livraison des messages dans les Réseaux Tolérants aux délais [19].

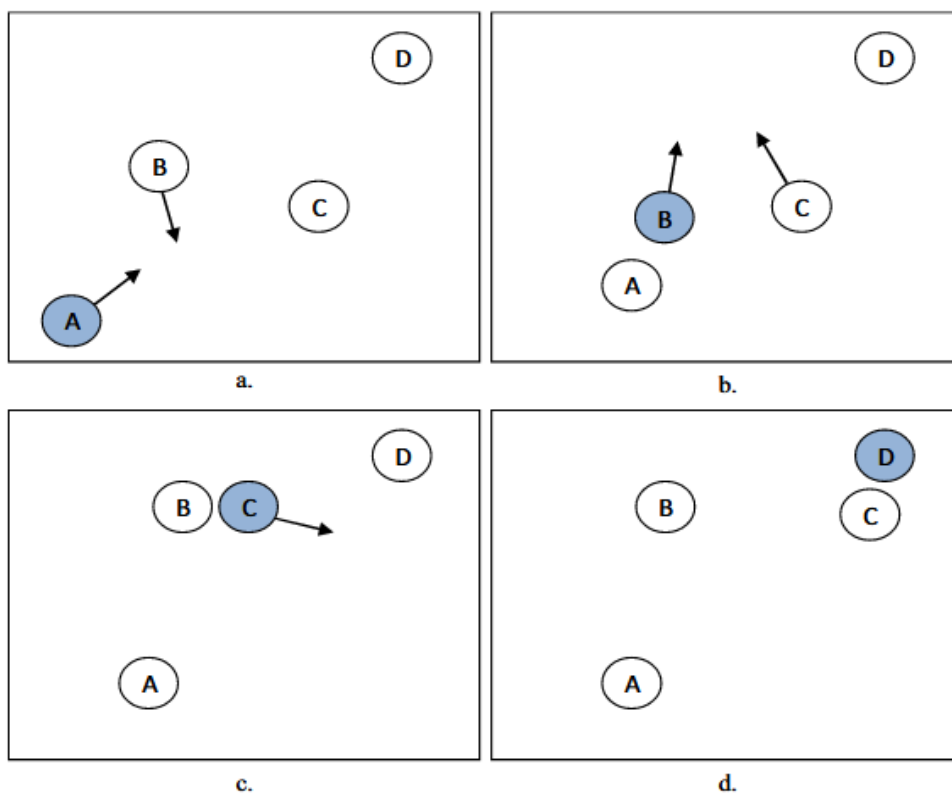


Figure 13: Principe de Protocol PROPHET [19]

### 6.3 MAXPROP

Le protocole MaxProp (maximum propagation) est un protocole de routage basé sur l'utilité conçu pour les réseaux tolérants au délai (DTNs).

Voici une explication détaillée du fonctionnement de MaxProp :

Au cœur de MaxProp se trouve une liste classée gérée par chaque nœud. Cette liste stocke des informations sur tous les messages que le nœud transporte, chaque entrée de message étant

associée à une destination spécifique. Le facteur clé de différenciation est le "coût" attribué à chaque destination. Ce coût représente une estimation de la probabilité de rencontrer un nœud capable de transporter le message plus près de sa destination finale.

MaxProp exploite les données historiques de rencontres pour estimer la probabilité de rencontres futures entre les nœuds. Si deux nœuds ont interagi fréquemment dans le passé, le coût de livraison d'un message à une destination accessible par ce nœud sera plus faible.

Lorsque des nœuds se rencontrent, MaxProp priorise le transfert de messages en fonction du coût de livraison estimé. Les messages avec des coûts plus bas (probabilité de livraison plus élevée) sont transférés en premier.

Chaque nœud dispose d'une mémoire tampon limitée pour stocker les messages. Si la mémoire tampon est pleine, MaxProp utilise une stratégie de suppression qui priorise les messages avec des coûts plus élevés (probabilité de livraison plus faible) pour faire de la place pour des messages potentiellement plus livrables.

Les nœuds qui reçoivent des messages renvoient des accusés de réception à l'expéditeur d'origine, l'informant de la réussite de la livraison. Cela permet de supprimer les copies redondantes, de mettre à jour les estimations de coût et d'empêcher un nœud de recevoir plusieurs fois le même message [20] [21].

### 6.4 SPRAY AND WAIT

Le protocole Spray and Wait adopte une approche unique pour le routage des messages dans les réseaux tolérants aux retards (DTN). Contrairement aux protocoles d'inondation qui diffusent les messages à l'infini, le protocole Spray-and-Wait fonctionne en deux phases : la phase de "Spray" ou Diffusion et la phase de "wait" ou Attente.

- **Spray** : Lorsqu'un nœud souhaite envoyer un message, il crée un nombre prédéfini de copies. Ces copies sont ensuite transmises à un ensemble de nœuds voisins choisis aléatoirement à portée de transmission. Cette diffusion initiale augmente La portée de message au sein du réseau.
- **Waiting**: Après avoir diffusé les copies, le nœud source entre en phase d'attente. Il surveille ses rencontres avec d'autres nœuds, à la recherche d'une chance de livrer directement le message à un nœud plus proche du destinataire prévu.

Si le nœud source rencontre un nœud ayant une plus forte probabilité d'atteindre la destination (en fonction de facteurs tels que l'historique des rencontres ou les tables de routage), il transmet le message directement à ce nœud. Cette approche opportuniste exploite la nature dynamique des DTN pour trouver le chemin de livraison le plus efficace.

Tout au long de la phase d'attente, le nœud source peut recevoir des accusés de réception des nœuds destinataires ou d'autres nœuds ayant déjà reçu une copie. Sur la base de ces informations, la source peut décider d'annuler toutes les copies restantes en transit afin d'éviter une congestion inutile du réseau. Dans certains cas, si le temps d'attente s'allonge ou si aucune opportunité de livraison adéquate ne se présente, la source peut choisir de re-diffuser des copies supplémentaires pour relancer la recherche d'un bon transporteur [22] [23].

### **6.5 DIRECT DELIVERY**

Direct Delivery ou la livraison directe est une approche de routage à copie unique assez simple, utilisée pour envoyer des données vers leur destination sans aucune connaissance du réseau pour prendre des décisions de transfert. C'est une forme dégénérée d'inondation dans laquelle le paquet est transmis au nombre minimum de sauts suivants. Dans le protocole de routage à livraison directe, le paquet ne sera transféré que lorsque le nœud source sera en contact direct avec la destination finale. En d'autres termes, la livraison des messages n'est réussie que si la source et la destination sont des voisins immédiats ou à un saut l'un de l'autre. Le nœud source, qui rencontre plusieurs nœuds différents, conserve le paquet jusqu'à ce qu'il rencontre le nœud de destination afin de le lui remettre directement. Par conséquent, aucun relais n'est effectué dans cette approche de routage, car chaque nœud doit acheminer les paquets par lui-même [34].

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présentés quelques principes généraux sur le routage dans les DTN, et illustré ceux-ci à travers des exemples sur les protocoles de routage. Le prochain chapitre sera consacré à la simulation et la comparaison des protocoles de routage et l'analyse des résultats.

# CHAPITRE 3 : ANALYSE ET RESULTATS

## 1. PRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION

Divers outils de simulation faciles à utiliser sont disponibles pour simuler les algorithmes des réseaux mobiles. En raison de l'environnement de déconnexion fréquente des nœuds, ces outils ne peuvent pas fonctionner correctement dans les implémentations DTN. Par conséquent, des expériences basées sur la simulation ont été menées afin de mener une étude pratique appropriée.

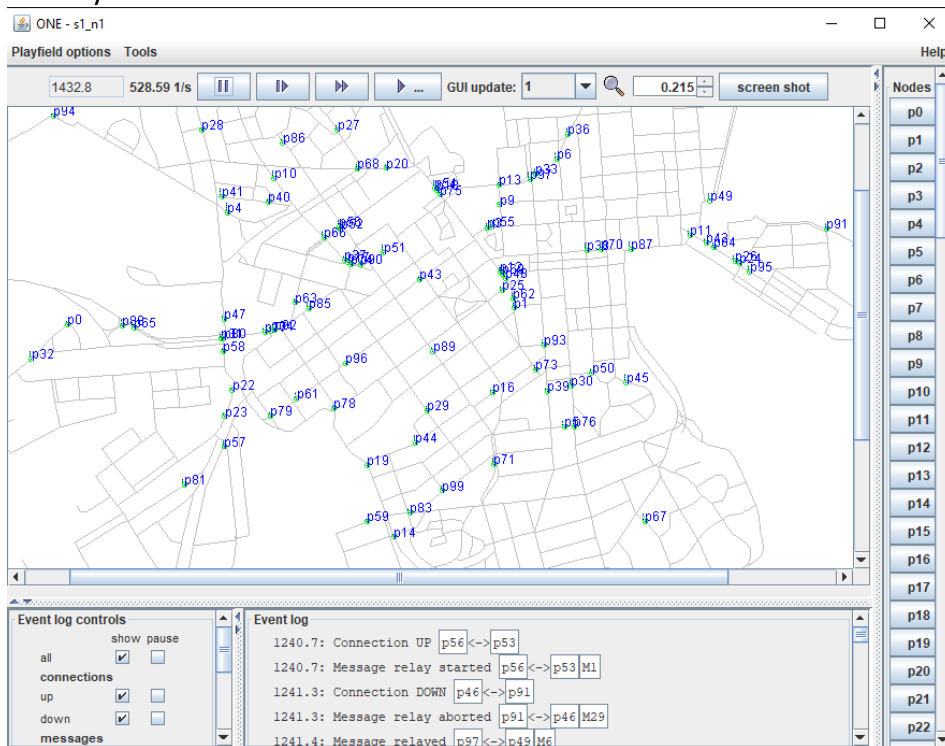
- **Opportunistic Network Environment (ONE)** est un simulateur basé sur Java destiné à la recherche sur les réseaux tolérants aux délais (DTN) et ses variantes telles que les réseaux mobiles opportunistes (OMN). En plus de permettre aux utilisateurs de simuler différents scénarios de manière rapide et flexible, ONE offre également un moyen simple de générer des statistiques à partir des simulations effectuées. Le simulateur ONE peut être exécuté sur Linux, Windows ou toute autre plateforme prenant en charge Java.

La simulation joue un rôle important dans l'analyse du comportement et des performances de divers protocoles de routage et applications DTN. Le simulateur ONE est un outil basé sur Java qui offre un large éventail de capacités de protocoles dans un seul cadre. Ce simulateur fournit un cadre pour la mise en œuvre de différents protocoles de routage DTN et permet la création de multiples scénarios basés sur différents modèles de mouvement.

### Voici quelques fonctionnalités clés du simulateur ONE :

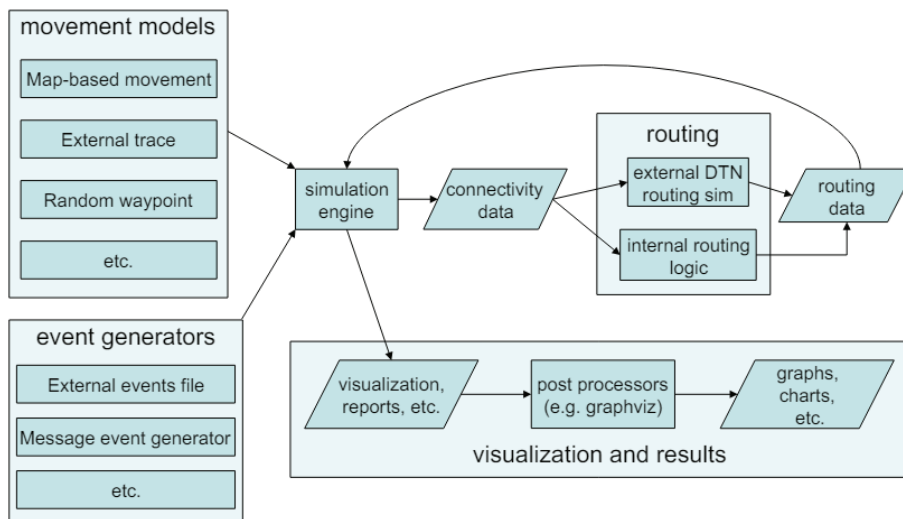
- **Modèles de mouvement** : Il peut simuler le mouvement des appareils en utilisant divers modèles prédéfinis ou en important des données de mouvements réels.
- **Protocoles de routage** : Il permet d'expérimenter différents protocoles de routage DTN pour voir comment ils fonctionnent dans diverses conditions.
- **Visualisation** : Il fournit une interface graphique utilisateur (GUI) pour visualiser le mouvement des appareils et le flux des messages entre eux.
- **Rapports** : Il peut générer des rapports sur divers indicateurs, tels que le taux de succès de la livraison des messages, le délai et le nombre de **sauts**.

### Chapitre 3 : Analyses et Resultats



**Figure 14:** Screenshot sur l'interface du ONE simulateur

Les principales fonctions du simulateur ONE sont la modélisation des déplacements des nœuds, des contacts entre les nœuds, du routage et de la gestion des messages. La collecte et l'analyse des résultats se font via la visualisation, des rapports et des outils de post-traitement. Les éléments et leurs interactions sont illustrés dans la figure ci-dessous : [26]



**Figure 15:** Aperçu de l'environnement de simulation ONE [26]



## 2. METRIQUES DE COMPARAISON

Dans cette section nous présentons les métriques de comparaison pour évaluer les performances des protocoles de routage DTN. Nous nous concentrons sur juste trois métriques : Taux de livraison, la latence moyenne et l'Overhead ratio :

### 2.1 DELIVERY RATIO (TAUX DE LIVRAISON) :

Il s'agit de la mesure la plus importante de la performance du réseau. Comme un DTN fonctionne dans un environnement difficile où le message est généralement perdu ou abandonné avant d'atteindre sa destination réelle, cette mesure peut être définie comme le ratio entre les messages générés et les messages correctement délivrés sur une période donnée. Un bon protocole de routage doit permettre d'améliorer le taux de distribution des paquets.

- La formule de calcul est la suivante :

Taux de livraison = Nombre de messages livrés à la destination / Nombre de messages envoyés

### 2.2 LATENCY AVERAGE (LATENCE MOYENNE) :

Il s'agit de la deuxième mesure la plus importante de la performance du réseau. Cet indicateur de retard de bout en bout mesure le temps écoulé entre le moment où le message est généré à la source et celui où il est reçu à la destination. Il faut donc minimiser le retard de bout en bout.

### 2.3 OVERHEAD RATIO :

Il est calculé comme la différence entre le nombre de messages relayés et livrés et le nombre de messages livrés.

- Le taux de surcharge reflète le coût de transmission sur un réseau, par exemple le nombre de paquets redondants qui sont acheminés pour délivrer un seul paquet.

La formule de calcul est la suivante :

Overhead Ratio = (Nombre de message relayés - Nombre de messages délivrés / Nombre de messages délivrés).

## 3. SIMULATION

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous nous concentrons sur trois métriques en variant certains paramètres, qui incluent le nombre de nœuds, la vitesse des nœuds, la taille du tampon et le TTL (Time-To-Live) afin d'étudier l'impact de ces paramètres sur la performance.

### 3.1 PARAMETRES DE SIMULATION

<b>La superficie de la simulation</b>	la largeur 4500, la hauteur 3400 (mètres).
<b>La taille des messages</b>	500 Ko jusqu'à 1 Mo.
<b>L'intervalle de création des messages</b>	chaque 25 à 35 seconds.
<b>Message TTL (TimeToLive)</b>	300 minutes (5 heures).
<b>L'interface des noeuds type d'interface</b>	Bluetooth, vitesse de transmission 500 Ko/s, portée 10 mètres.
<b>Le modèle de mobilité</b>	Shortest Path MapBasedMovement
<b>Le temps d'attente</b>	0 à 120 seconds.
<b>La taille de la mémoire tampon</b>	50 Mo.
<b>La vitesse des nœuds</b>	Vmin 7 m/s Vmax : 10 m/s.
<b>Le temps de simulation</b>	14400 secondes (4 heures).

### 3.2 SCENARIO 1 : IMPACT DU NOMBRE DES NŒUDS :

Dans ce premier scenario, nous avons pris le nombre des nœuds comme facteur de comparaison, et les autres paramètres ont été fixé :

#### 3.2.1 Overhead ratio

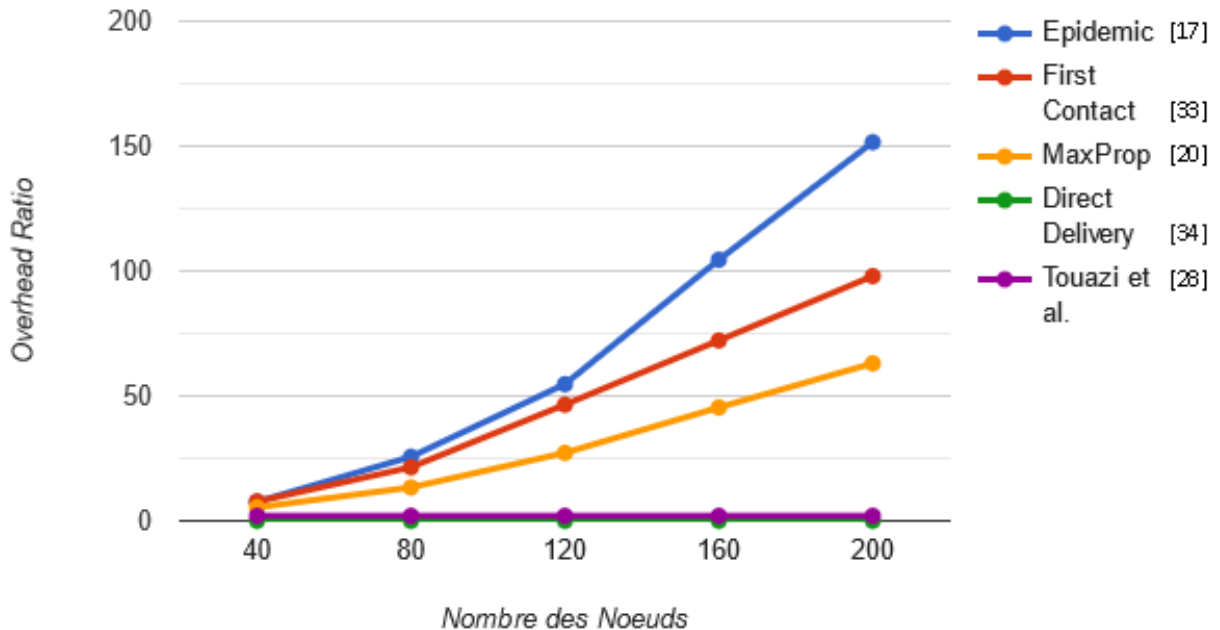
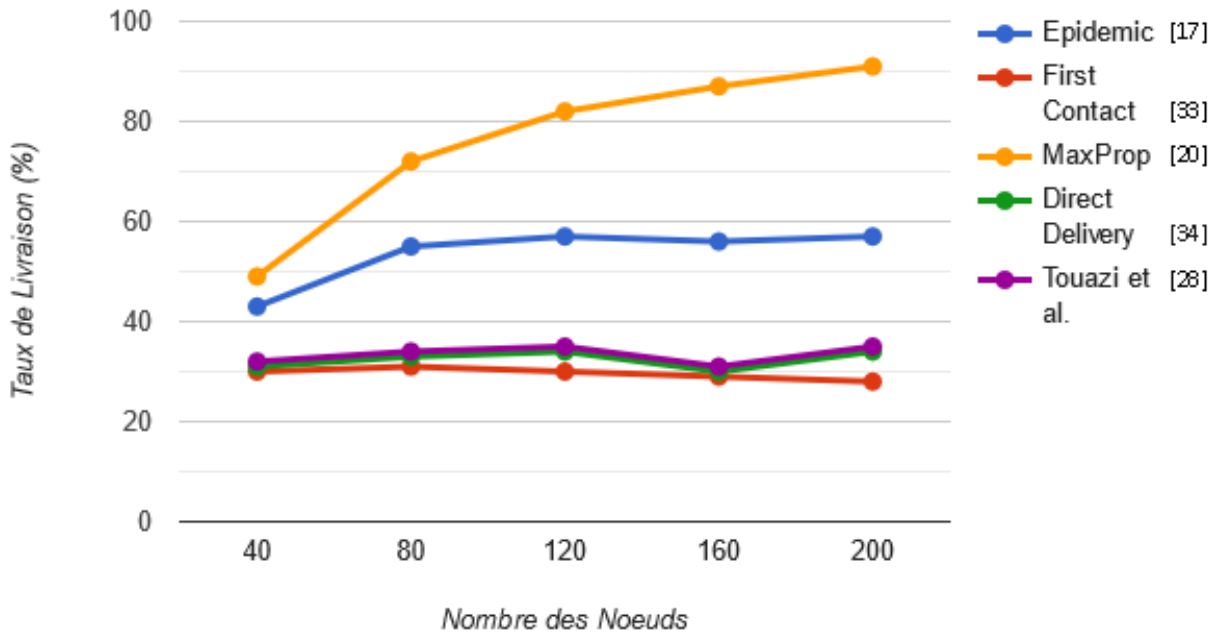


Figure 16: Overhead ratio en fonction du nombre des nœuds

### Chapitre 3 : Analyses et Resultats

Le graphe illustre clairement que le protocole Epidemic est le moins performant en termes de surcharge, surtout lorsque le nombre de nœuds est élevé. Cette inefficacité est due à la nature du protocole qui repose sur la réplication massive des messages pour assurer leur livraison, entraînant une consommation excessive des ressources réseau. First Contact et MaxProp présentent des augmentations de surcharge plus modérées, avec First Contact est plus efficace en termes de gestion de la surcharge, malgré qu'il ne soit pas aussi performant dans des réseaux très larges, et MaxProp offrant une meilleure efficacité globale grâce à ces techniques de priorisation et de planification des messages pour réduire la surcharge, ce qui le rend plus efficace dans des réseaux de taille moyenne à grande. Direct Delivery et le protocole de Touazi et al. Avec une surcharge nulle, se présentent comme les protocoles les plus efficaces dans ce contexte spécifique.

#### 3.2.2 Taux de livraison

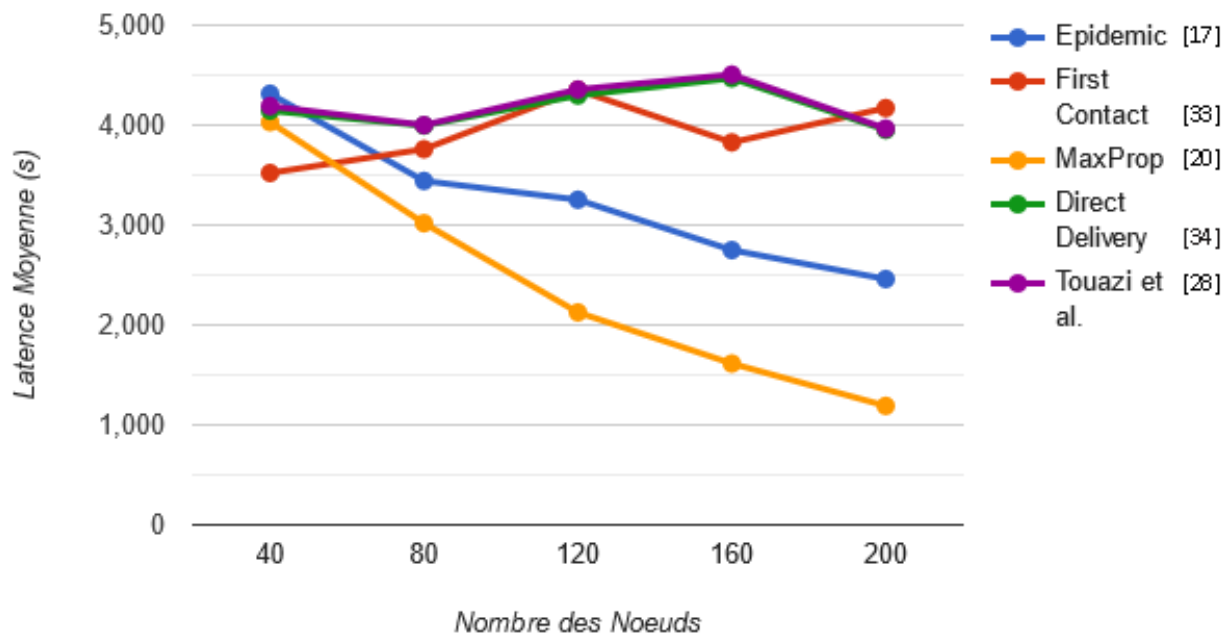


**Figure 17:** Taux de livraison en fonction du nombre des nœuds

Les résultats du graphe montrent que MaxProp est de loin le protocole le plus efficace en termes de taux de livraison, surtout avec l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau. Epidemic, bien qu'efficace avec un taux de livraison modéré, ne montre pas d'amélioration significative avec plus de nœuds. Tandis que First Contact et Direct Delivery, ne parviennent pas à augmenter efficacement le taux de livraison cela s'explique par le fait que Le protocole First Contact basé sur le routage au premier contact, ne bénéficie pas beaucoup de l'augmentation du

nombre de nœuds, ce qui peut limiter son efficacité dans les réseaux plus denses ,et que comme Le protocole Direct Delivery n'implique aucun routage intermédiaire, chaque message doit attendre jusqu'à ce qu'il rencontre directement son destinataire, limitant ainsi l'efficacité du taux de livraison. Le protocole 'Touazi et al.' montre un taux de livraison constant et faible, inférieur à MaxProp et Epidemic, indiquant qu'il privilégie la réduction de l'overhead plutôt que d'atteindre un taux de livraison maximal.

### 3.2.3 Latence Moyenne:



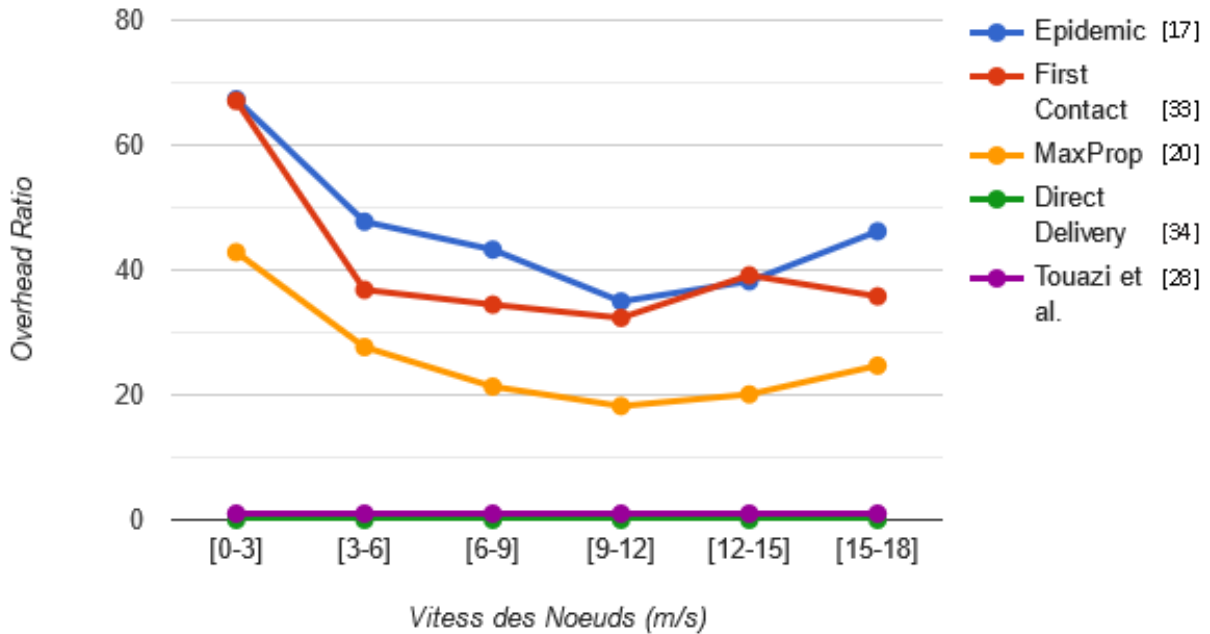
**Figure 18:** Latence moyenne en fonction du nombre des nœuds

On observe que le protocole MaxProp se distingue par une latence moyenne initialement élevée avec un petit nombre de nœuds 40, mais cette latence diminue significativement à mesure que le nombre de nœuds augmente. À 200 nœuds, la latence moyenne tombe à environ 1 000 secondes. Cette performance peut être attribuée à l'efficacité de MaxProp dans la gestion des files d'attente ce qui permet une réduction efficace de la latence avec l'augmentation du nombre de nœuds. Epidemic, présente une latence moyenne plus élevée que MaxProp et inferieur au deux autre protocoles First Contact et Direct Delivery en raison de sa surcharge. First Contact et Direct Delivery, malgré leur simplicité, ne parviennent pas à réduire efficacement la latence moyenne et de meme pour le protocole 'Touazi et al.' qui maintient une latence relativement stable et élevée.

### 3.3 SCENARIO 2 : IMPACT DE LA VITESSE DES NŒUDS :

Dans ce deuxième scenario, nous avons changé le facteur de comparaison, nous avons la vitesse des nœuds comme facteur de comparaison, et les autres paramètres ont été fixé :

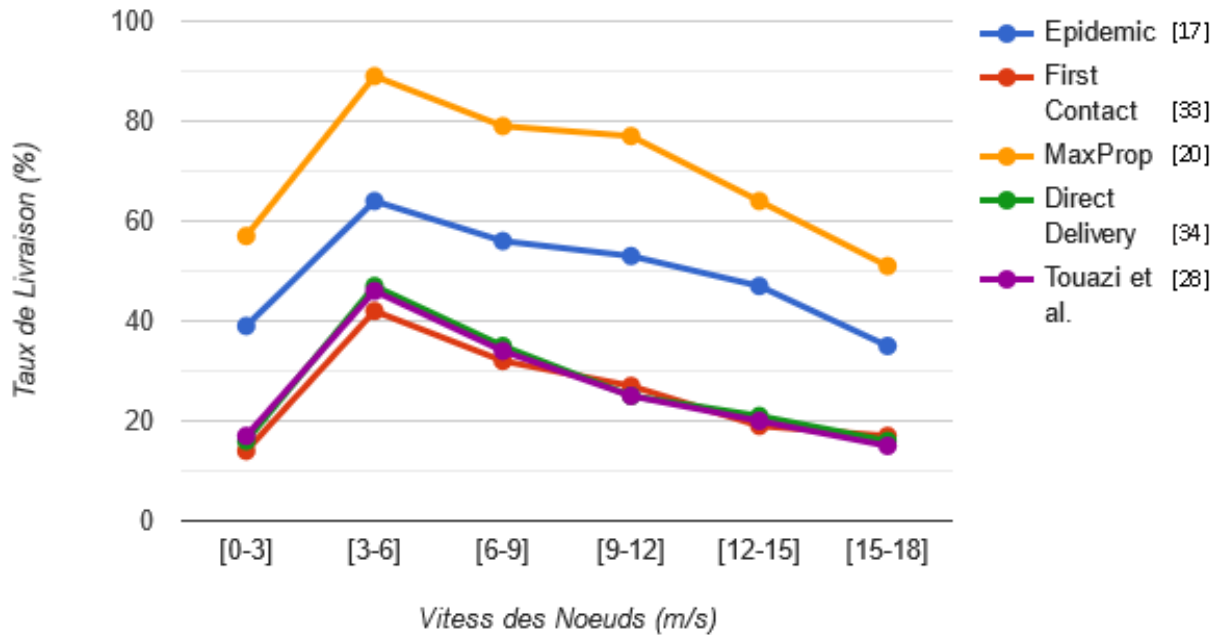
#### 3.3.1 Overhead ratio



**Figure 19:** Overhead ratio en fonction de la vitesse des nœuds

Les résultats du graphe montrent que le choix du protocole de routage a un impact significatif sur le ratio de surcharge dans le réseau. Le protocole Epidemic génère la plus grande surcharge, particulièrement à des vitesses de nœuds plus basses, Ce comportement peut s'expliquer par le mécanisme de diffusion massive de ce protocole, qui génère beaucoup de trafic supplémentaire, particulièrement notable à des vitesses plus basses où les nœuds ont plus de temps pour échanger des messages multiples. Tandis que MaxProp offre une solution plus équilibrée avec une surcharge réduite grâce à une gestion efficace de la file d'attente et des priorités de message, minimisant ainsi le trafic supplémentaire. First Contact se situe entre ces deux en termes de surcharge générée. Les protocoles ‘Touazi et al.’ et Direct Delivery affichent un ratio de surcharge nul à travers toutes les vitesses des nœuds le premier confirme son approche optimisée de routage qui évite la surcharge réseau.

### 3.3.2 Taux de Livraison

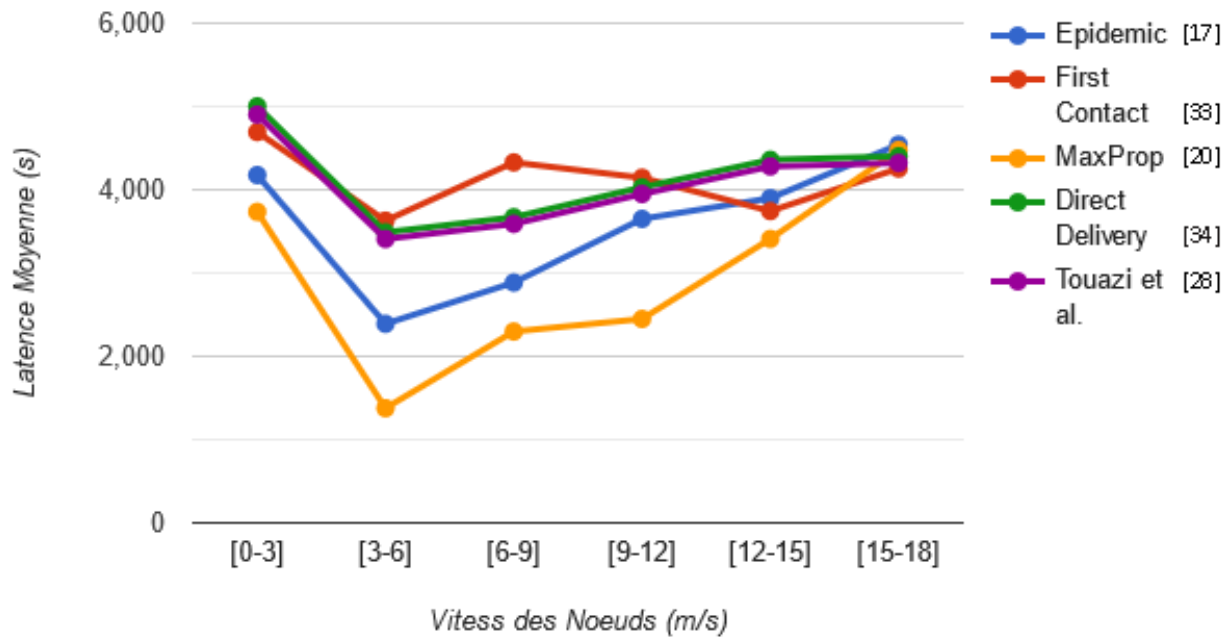


**Figure 20:** Taux de livraison en fonction de la vitesse des nœuds

Ces résultats indiquent que le protocole MaxProp est le plus efficace pour maintenir un taux de livraison élevé à travers une gamme variée de vitesses des nœuds, ce qui peut être attribué à ses mécanismes avancés de gestion de la file d'attente et de la priorité des messages. Le protocole Epidemic, bien que performant, est moins efficace à des vitesses plus élevées, probablement en raison de l'augmentation de la congestion et de la surcharge des messages. Les protocoles First Contact et Direct Delivery, étant plus simples, souffrent de limitations plus prononcées en termes de taux de livraison à des vitesses de nœuds plus élevées. Le protocole 'Touazi et al.' montre un taux de livraison qui faible par rapport à d'autres protocoles comme MaxProp Cette performance indique une priorisation des ressources pour éviter la congestion

Le choix du protocole de routage dans un réseau sans fil devrait prendre en compte la vitesse moyenne des nœuds pour optimiser le taux de livraison, MaxProp étant le choix recommandé pour des environnements où les nœuds se déplacent à des vitesses variables.

### 3.3.3 Latence Moyenne



**Figure 21:** Latence moyenne en fonction de la vitesse des nœuds

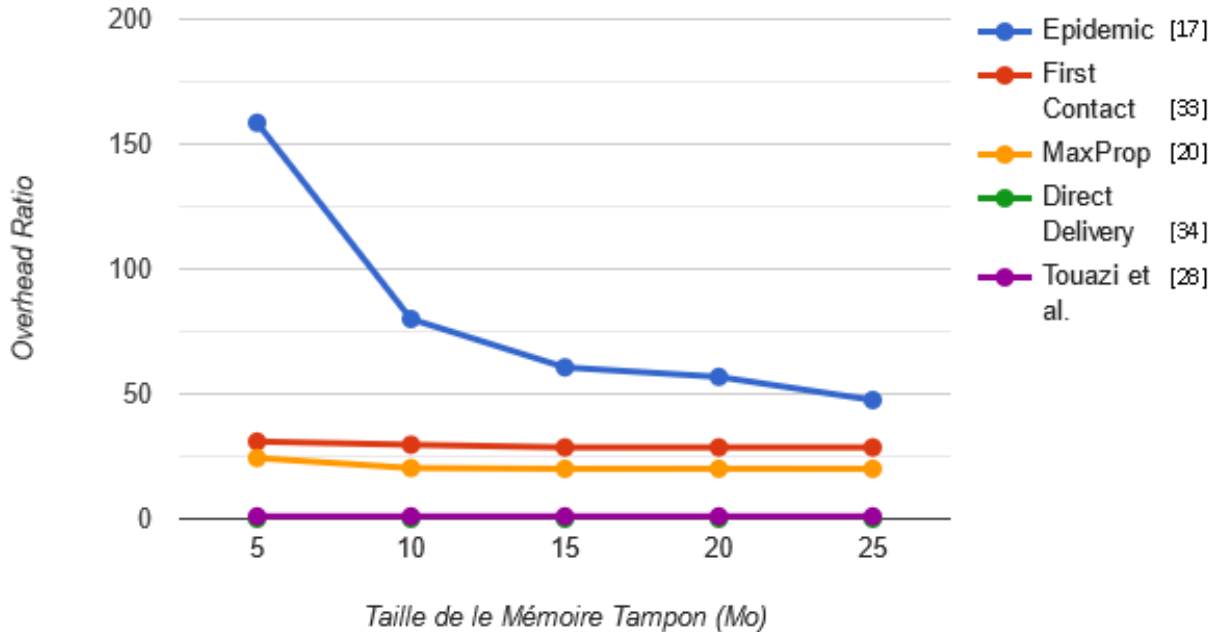
Le protocole MaxProp maintient systématiquement une latence plus faible par rapport aux autres protocoles, indiquant une meilleure performance dans des conditions variées de vitesse des nœuds. Epidemic et First Contact montrent des latences intermédiaires, tandis que Direct Delivery, bien qu'amélioré à certaines vitesses, reste généralement moins performant. Ces résultats suggèrent que, dans des environnements de réseau mobile où la vitesse des nœuds varie, MaxProp serait le protocole le plus efficace pour minimiser la latence et assurer une transmission rapide des messages. Le protocole "Touazi et al." montre une latence moyenne très élevée, avec une croissance quasi-linéaire à mesure que la vitesse des nœuds augmente peut s'expliquer par l'incapacité du protocole à gérer efficacement les opportunités de contact à des vitesses élevée.

### 3.4 SCENARIO 3 : IMPACT DE LA TAILLE DE LA MEMOIRE TAMPON

Dans ce troisième scenario, nous avons changé le facteur de comparaison, nous avons pris la taille de la mémoire tampon comme facteur de comparaison, et les autres paramètres ont été fixé :

Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures suivantes :

### 3.4.1 Overhead ratio



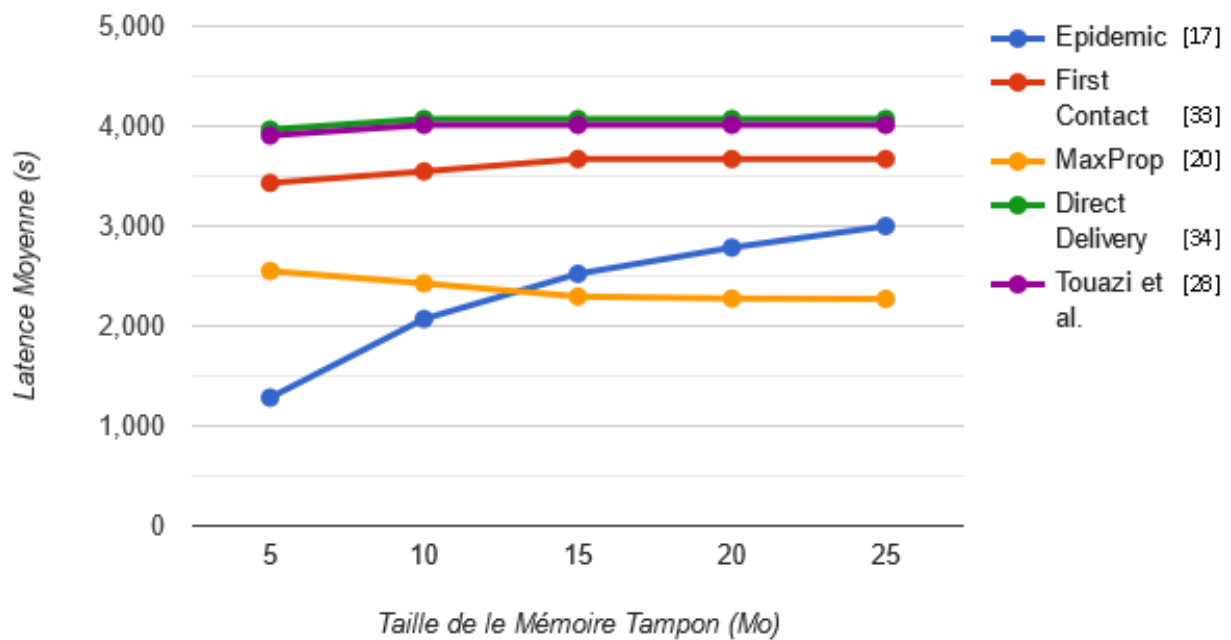
**Figure 22:** overhead ration en fonction de la mémoire tampon

On observe que le Protocol Epidemic présente un ratio d'overhead initialement élevé pour une petite taille de mémoire tampon, mais celui-ci diminue significativement avec l'augmentation de la mémoire tampon. Cela s'explique par la nature de diffusion massive de ce protocole, où chaque message est envoyé à tous les nœuds rencontrés. Cela entraîne un overhead élevé lorsque la mémoire tampon est petite, car il y a beaucoup de messages en circulation. À mesure que la mémoire tampon augmente, plus de messages peuvent être stockés, réduisant ainsi le besoin de retransmissions fréquentes et donc l'overhead. En revanche, les protocoles First Contact et MaxProp maintiennent un overhead bas et relativement constant, avec une légère amélioration pour MaxProp lorsque la mémoire tampon est plus grande. Ces résultats montrent que la gestion de la mémoire tampon est cruciale pour réduire l'overhead le premier envoi des messages



uniquement lors du premier contact avec un autre nœud ce qui génère peu d'overhead, car il n'y a pas de retransmissions multiples, et la taille de la mémoire tampon n'a donc pas un impact significatif sur le ratio d'overhead. Le deuxième utilise une stratégie de priorisation des messages basée sur la probabilité de livraison. Cela permet de gérer efficacement les messages même avec une petite mémoire tampon, et l'augmentation de la taille de la mémoire tampon améliore légèrement l'efficacité en réduisant le besoin de retransmissions. Enfin, Direct Delivery et protocole Touazi et al. affichent une surcharge nulle le premier ne transmettant les messages qu'une seule fois directement au destinataire, donc il n'y a aucune retransmission, le deuxième témoigne de sa capacité à éviter les transmissions inutiles.

### 3.4.2 Latence moyenne

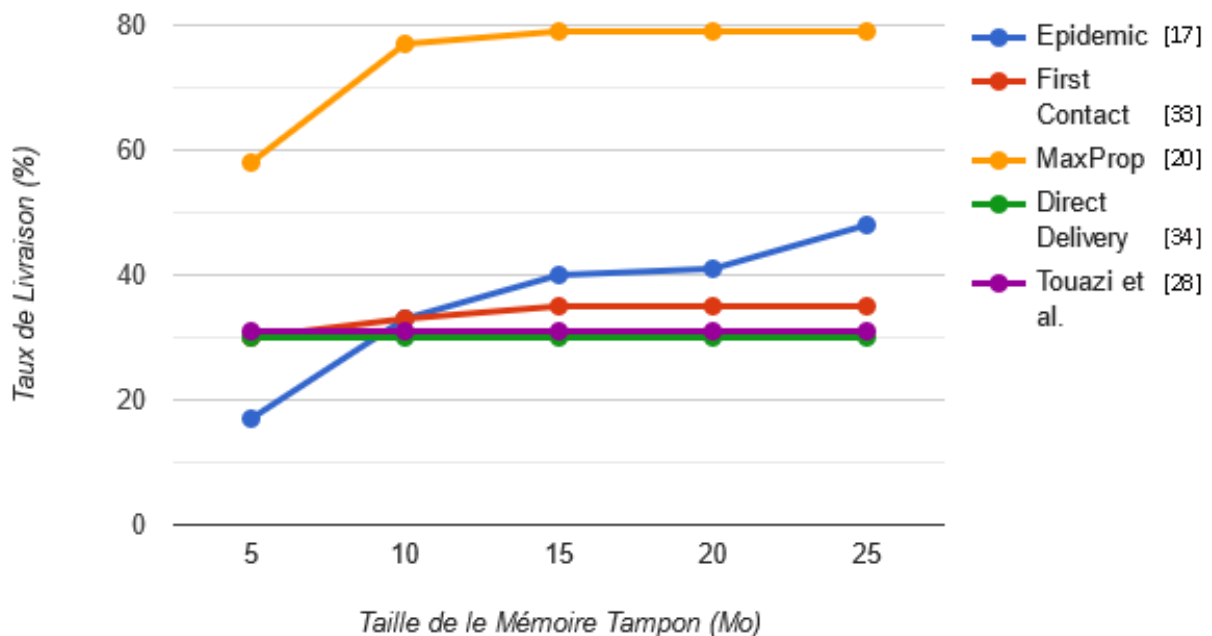


**Figure 23:** Latence moyenne en fonction de la mémoire tampon

Le graphe révèle que la latence moyenne pour le protocole Epidemic augmente avec l'augmentation de la taille de la mémoire tampon. Cette augmentation de la latence est due à la nature épidémique du protocole de générer de nombreuses copies de messages qui doivent être stockés et livrés à mesure que la mémoire tampon grandit. Pour First Contact, la latence reste relativement stable autour de 3 500 secondes, car le mécanisme de transmission unique au premier contact ne varie pas avec la taille de la mémoire tampon. MaxProp présente une latence stable d'environ 2 500 secondes, démontrant que son mécanisme d'optimisation des relais permet une livraison rapide et constante, quel que soit l'espace mémoire disponible. Direct Delivery, en raison

de sa dépendance à des rencontres opportunistes pour la livraison des messages, maintient une latence constante et élevée autour de 4 000 secondes, quelle que soit la taille de la mémoire tampon, et de même pour le protocole 'Touazi et al.' qui montre une latence relativement élevée par rapport aux autres protocoles lorsque la taille de la mémoire tampon augmente.

### 3.4.3 Taux de Livraison



**Figure 24:** Taux de livraison en fonction de la mémoire tampon

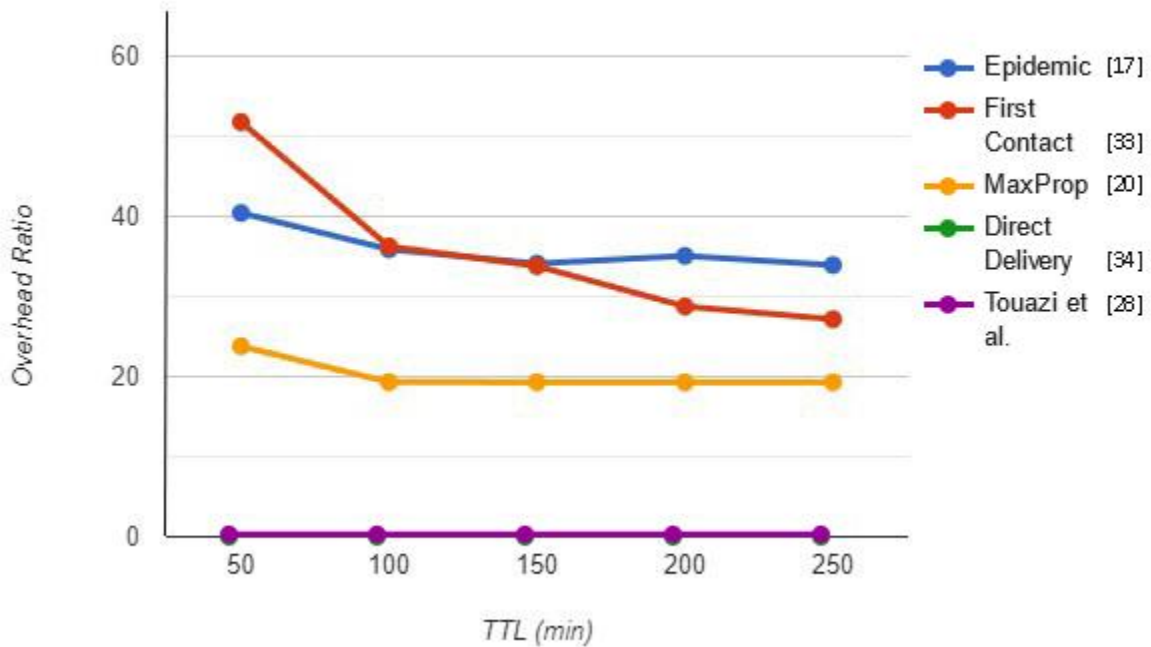
On voit que le protocole Epidemic voit son taux de livraison augmenter de 20% à environ 50% avec l'augmentation de la taille de la mémoire tampon. Cela s'explique par le fait que plus de mémoire permet de stocker et de transmettre plus de messages, augmentant ainsi les chances de livraison réussie. Le taux de livraison pour First Contact reste relativement stable autour de 35%, car la limitation des transmissions au premier contact maintient ce taux constant, et ne varie pas avec la taille de la mémoire tampon. MaxProp, quant à lui, voit son taux de livraison augmenter rapidement, atteignant environ 80% grâce à une gestion optimisée et une priorisation des messages, particulièrement efficace avec une mémoire tampon suffisante. Direct Delivery montre le taux de livraison le plus bas, autour de 25-30%, indépendant de la taille de la mémoire tampon. Ce résultat est attendu car Direct Delivery repose sur des contacts directs pour la livraison des messages, ce qui peut être inefficace dans des environnements où les nœuds sont rarement en contact direct. Le protocole 'Touazi et al.' montre un taux de livraison stable, inférieur à MaxProp et Epidemic, même avec une augmentation de la mémoire tampon. Cela reflète sa priorité pour minimiser la surcharge.

### 3.5 SCENARIO 4 : IMPACT DU TTL (TIME TO LIVE) DES MESSAGES :

Dans ce scenario, nous avons pris Le TTL des messages comme facteur de comparaison, et les autres paramètres ont été fixés

Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures suivantes :

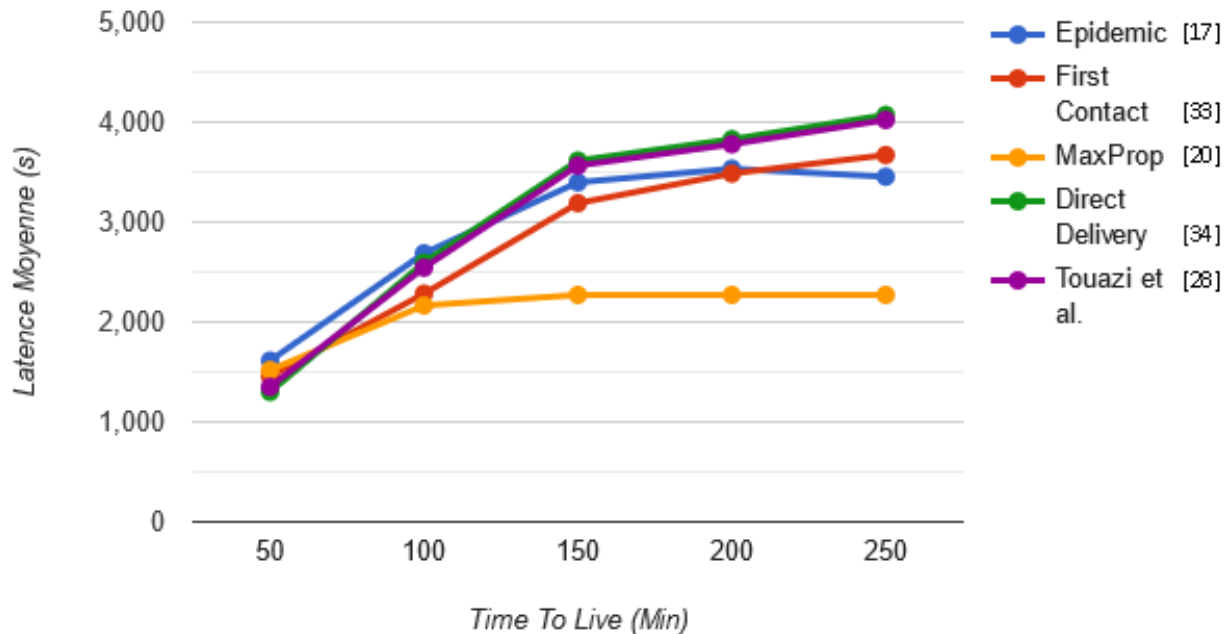
#### 3.5.1 Overhead ratio



**Figure 25:** Overhead ratio en fonction du TTL

Le graphe démontre que chaque protocole a un impact distinct sur le ratio d'overhead en fonction du TTL. Direct Delivery est le plus efficace en termes d'absence de surcharge, car les messages sont directement livrés au destinataire sans passer par des nœuds intermédiaires, tandis que First Contact et Epidemic présentent des surcharges initiales significatives avant de se stabiliser due à la nature des deux protocoles, le premier repose sur les premiers contacts rencontrés pour la transmission des messages, et le deuxième diffuse largement les messages pour garantir la livraison, ce qui génère une surcharge élevée. Au fur et à mesure que le temps passe, les messages atteignent leurs destinations, réduisant ainsi la surcharge. MaxProp maintient une surcharge intermédiaire mais stable, reflétant une gestion optimisée des ressources tout au long de la période de TTL étudiée. Le protocole 'Touazi et al.' conserve un ratio d'overhead nul, même avec un TTL plus long, démontrant son efficacité dans la gestion de la durée de vie des messages.

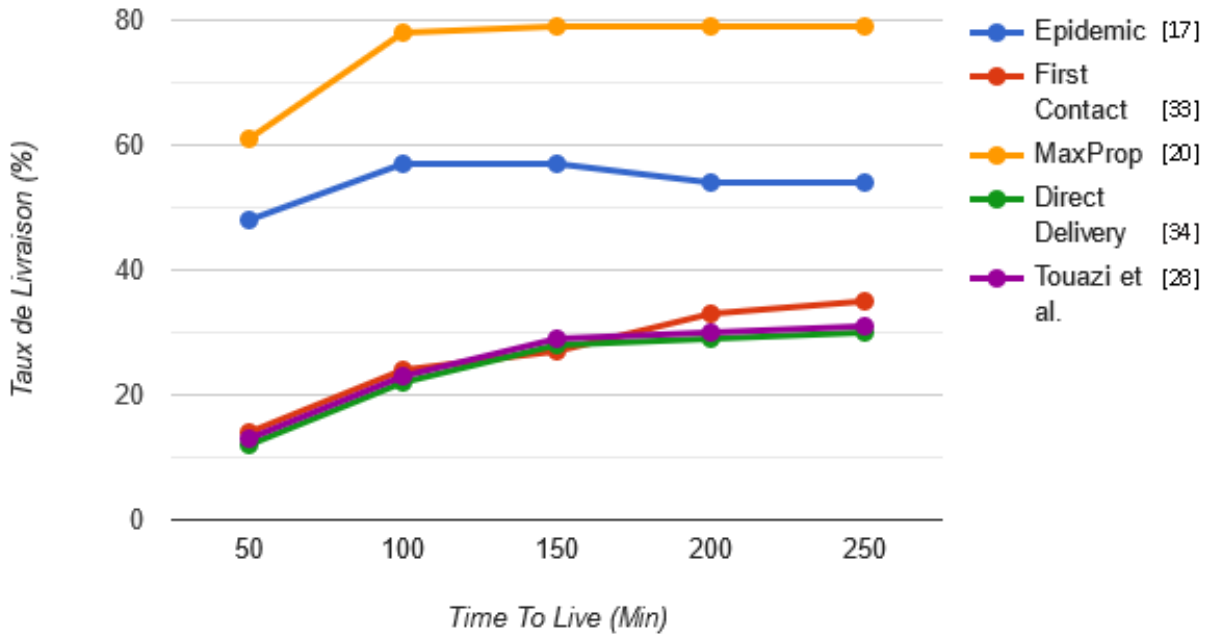
### 3.5.2 Latence moyenne



**Figure 26:** Latence moyenne en Fonction De TTL

Ce graphe montre que le protocole MaxProp est de loin le plus efficace en termes de latence, offrant une livraison rapide et stable des messages. Les autres protocoles, bien que moins performants, montrent des augmentations de latence qui reflètent leurs différentes stratégies de transmission. Direct Delivery, bien qu'ayant la latence la plus élevée, ce qui le rend inefficace pour des communications rapides. Epidemic et First Contact, avec leurs stratégies de diffusion plus agressives, offrent des latences intermédiaires, ce qui peut ne pas toujours être optimal en termes de rapidité. Ces résultats permettent de choisir le protocole le plus adapté en fonction des contraintes de latence et de la topologie du réseau. Le protocole "Touazi et al." montre une latence moyenne qui augmente de manière stable avec l'augmentation du TTL (Time to Live). Contrairement à des protocoles comme MaxProp, qui optimise efficacement la gestion des délais, le protocole de 'Touazi et al.' présente des performances plus limitées à mesure que le TTL s'étend. Cela pourrait s'expliquer par une priorisation des routes moins agressives, ce qui ralentit le temps de transmission des messages lorsque la durée de vie augmente.

### 3.5.3 Taux de livraison



**Figure 27:** Taux de livraison en fonction du TTL

Le graphe montre que MaxProp est le plus performant en termes de taux de livraison, Cela démontre l'efficacité de MaxProp dans la priorisation des messages et la gestion des ressources, assurant une livraison rapide et fiable des messages. Suivi par Epidemic qui offre une performance stable inférieur à celui de MaxProp mais il reste constant, ce qui montre sa capacité à diffuser largement les messages à travers le réseau. First Contact montre une amélioration progressive de sa performance de livraison à mesure que le temps passe, probablement en raison de l'accumulation des rencontres entre nœuds pour transmettre les messages, tandis que Direct Delivery a le taux de livraison le plus bas et le plus lent à augmenter. Le protocole 'Touazi et al.' montre un taux de livraison constant mais plus faible que MaxProp et Epidemic.

## 4. STRATEGIE D'OPTIMISATION

Pour une stratégie d'optimisation de la livraison de messages dans les réseaux tolérants aux délais, dans [28] Touazi et al. (2024) proposent une approche innovante basée sur l'optimisation prédictive des routes. Dans leur article intitulé "Predictive Road Optimization Strategy for Efficient Message Delivery in Delay-Tolerant Networks", ils présentent une méthode qui exploite les caractéristiques des routes et les patterns de mobilité pour améliorer l'efficacité de la livraison des messages en DTNs. L'objectif principal de cette recherche est de surmonter les défis liés aux connexions intermittentes et aux longs délais de transmission en utilisant une approche basée sur l'optimisation prédictive. La stratégie proposée prévoit les périodes de connectivité élevée et ajuste dynamiquement les routes de livraison des messages en conséquence. Les résultats expérimentaux confirment l'efficacité de cette approche, avec une réduction notable des délais de livraison et une augmentation du taux de succès de la livraison comparé aux protocoles traditionnels.

## 5. CONCLUSION

La simulation est essentielle pour évaluer le comportement et les performances des protocoles de routage dans les réseaux tolérants aux délais (DTN) en termes de taux de livraison, de latence moyenne et de taux de surcharge (Overhead ratio), cette étude a permis de modéliser différents scénarios en variant des paramètres tels que le nombre de nœuds, la vitesse des nœuds, la taille de la mémoire tampon et le Time-To-Live (TTL) des messages pour observer leur impact sur les performances. Nous avons utilisé le simulateur ONE où les hôtes se déplacent dans un réseau en utilisant la carte d'Helsinki, disponible dans le simulateur.

Les résultats de cette simulation montrent que chaque protocole de routage présente des caractéristiques distinctes en termes de surcharge, taux de livraison, et de latence. MaxProp se distingue par son efficacité en offrant un taux de livraison élevé et une faible latence grâce à ses mécanismes avancés de gestion des files d'attente et de priorisation des messages. À l'inverse, le protocole Epidemic, bien qu'efficace en termes de taux de livraison, génère une surcharge importante en raison de sa stratégie de diffusion massive des messages. First Contact et Direct Delivery, plus simples, montrent des limitations en termes de performance, notamment à des vitesses de nœuds élevées et dans des réseaux plus denses.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Au terme de cette étude sur les Réseaux Tolérants aux Délais (DTNs), nous avons pu démontrer l'importance de ces réseaux dans des environnements où les connexions sont intermittentes et les délais de transmission variables. Les DTNs se distinguent par leur capacité à fonctionner efficacement malgré des conditions difficiles, grâce à des mécanismes robustes de gestion des délais et de la fiabilité.

À travers l'analyse des caractéristiques fondamentales, de l'architecture, et des protocoles de routage des DTNs, nous avons mis en évidence les points forts et les limitations de ces réseaux. Les résultats obtenus à partir des simulations montrent que les DTNs peuvent maintenir un niveau élevé de performance, même dans des scénarios complexes et variés. Les différentes stratégies de routage et les modèles de mobilité examinés ont démontré la flexibilité et l'adaptabilité de ces réseaux.

Cependant, il reste des défis à surmonter, notamment en termes de sécurité, de gestion de la congestion, et de standardisation des protocoles. Les avancées dans ces domaines seront cruciales pour améliorer l'efficacité et l'adoption des DTNs dans des applications pratiques.

Ce mémoire a montré que les Réseaux Tolérants aux Délais (DTNs) offrent une solution efficace pour des environnements où les réseaux traditionnels échouent, en particulier dans les zones où la connectivité est intermittente et les délais de transmission imprévisibles. Grâce à leur architecture unique, basée sur le principe du "store-and-forward", et à l'utilisation de protocoles de routage adaptés, les DTNs permettent de garantir la fiabilité des communications malgré des conditions défavorables.

Les simulations ont démontré l'efficacité des principaux protocoles de routage (Epidemic, PROPHET, MaxProp, etc.), chacun ayant ses avantages selon les contextes de mobilité et de ressources disponibles. Toutefois, les défis liés à la gestion de la congestion et à la sécurisation des données restent des obstacles majeurs à surmonter pour une adoption plus large des DTNs.

En conclusion, les DTNs représentent une avancée importante dans le domaine des communications en environnements difficiles, avec un fort potentiel pour des applications variées, comme les communications d'urgence ou les missions spatiales. Des efforts futurs doivent être consacrés à améliorer leur performance et leur sécurité, pour qu'ils puissent devenir une solution de référence dans des scénarios de connectivité réduite.

### Perspectives

Les perspectives pour les DTNs sont vastes et prometteuses. Voici quelques axes de recherche futurs qui pourraient être explorés pour renforcer l'efficacité et l'adoption des DTNs :

#### 1. Amélioration de la Sécurité :

- Développer des protocoles de sécurité robustes pour protéger les données transmises via les DTNs contre les attaques potentielles.

2. **Gestion de la Congestion :**
  - Étudier des mécanismes avancés de gestion de la congestion pour optimiser les performances des DTNs, particulièrement dans des scénarios de charge élevée.
3. **Standardisation des Protocoles :**
  - Travailler à la standardisation des protocoles de DTNs pour faciliter leur intégration et leur déploiement à grande échelle.
4. **Applications Pratiques :**
  - Explorer de nouvelles applications des DTNs dans des domaines variés tels que les communications d'urgence, les réseaux de capteurs environnementaux, et les infrastructures de télécommunications en zones rurales ou sous-développées.
5. **Intégration avec les Technologies Émergentes :**
  - Étudier l'intégration des DTNs avec des technologies émergentes comme l'Internet des Objets (IoT), la 5G, et les réseaux satellitaires pour créer des solutions de communication plus complètes et résilientes.

En conclusion, les DTNs représentent une solution innovante pour les défis de communication moderne dans des environnements contraints par les délais et les interruptions de connectivité. En poursuivant cette ligne de recherche, nous pouvons espérer des améliorations significatives dans la manière dont nous concevons et utilisons les réseaux de communication dans un avenir proche



# **ANNEXES**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mohamed Chakib Baouche. Une solution tolérante aux délais pour des applications de localisation et de traçabilité a posteriori en milieux confinés. *Thèse de Doctorat*, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012. Français.
- [2] F. Greff., Vers l'Internet interplanétaire : mise en œuvre d'un réseau DTN dans un contexte de simulation d'une liaison spatiale. Réseaux et télécommunications, [cs.NI], *Thèse de Doctorat*, 2014.
- [3] Harras, K. A., & Almeroth, K. C. (2006). Transport layer issues in delay tolerant mobile networks. In *Lecture notes in computer science* (pp. 463–475). [https://doi.org/10.1007/11753810\\_39](https://doi.org/10.1007/11753810_39)
- [4] Mundur, P., Lee, S., & Seligman, M. (2006). Routing in Delay Tolerant Networks Using Storage Domains. *Z*.
- [5] Cerf, V., Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Durst, R., Scott, K., Fall, K., & Weiss, H. (2007). *Delay-Tolerant Networking architecture*. <https://doi.org/10.17487/rfc483>
- [6] L. K. C. M. K. A. U. Chaurasiya, «Practical Routing Strategy in Delay-Tolerant Networks: A Survey,» *International Journal of Computer Science and Information Security*, vol. 11, July 2013.
- [7] Spyropoulos, T., Psounis, K., & Raghavendra, C. (2008). Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the Multiple-Copy case. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(1), 77–90. <https://doi.org/10.1109/tnet.2007.897964>
- [8] Wang, N. L., Zhang, N. L., Shu, N. Y., & Dong, N. M. (2002). Multipath source routing in wireless ad hoc networks. *Z*. <https://doi.org/10.1109/ccece.2000.849755>
- [9] Biswas, S., & Morris, R. (2005). ExOR. *Computer Communication Review*, 35(4), 133–144. <https://doi.org/10.1145/1090191.1080108>
- [10] F. e. a. Bai, «Social-Based Routing for Delay Tolerant Networks: A Survey.,» *ACM Computing Surveys*, 2014.
- [11] X. e. a. Liu, «A Survey on Mobility Modeling and Data Dissemination in Wireless Sensor Networks,» *Transactions on Wireless Communications*, 2006.
- [12] F. e. a. Catteno, «Interference and Connectivity Analysis of Networked Drones in Urban Environments.,» *Transactions on Vehicular Technology*, 2018.

## BIBLIOGRAPHIE

- [13] M. a. D. J. Ott, «Geographic Opportunistic Routing in Intermittently Connected Networks».
- [14] X. e. a. Liu, «A Survey of Mobility Modeling Techniques for Ad Hoc Wireless Networks,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials* , 2012.
- [15] Shukla, Shivi, Amit Munjal, and Y. N. Singh. "Routing protocol Approaches in Delay Tolerant Networks." *International Conference on Educational and Information Technology MCNC*. 2015.
- [16] A. M. a. Y. N. S. Shivi Shukla, «Routing Protocol Approaches in Delay Tolerant Networks».
- [17] A. Vahdat and D. Becker, *Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks*, CS-200006, éd., Duke University, Technical Report , 2000..
- [18] H. Lenando and M. Alrfaay, «EpSoc: Social-Based Epidemic-Based Routing Protocol in Opportunistic Mobile Social Network,» *Mobile Information Systems* , 2018.
- [19] Sok, P., Tan, S., & Kim, K. (2013). PROPHET Routing Protocol Based on Neighbor Node Distance Using a Community Mobility Model in Delay Tolerant Networks. Z. <https://doi.org/10.1109/hpcc.and.euc.2013.175>
- [20] Burgess, J., Gallagher, B., Jensen, D., & Levine, B. N. (2006). MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks. Z. <https://doi.org/10.1109/infocom.2006.228>
- [21] Vasilakos, A. V., Zhang, Y., & Spyropoulos, T. (2016). *Delay tolerant networks: Protocols and Applications*. CRC Press.
- [22] Al, P. G. E. (2021). Performance Comparison of Fresh and Spray & Wait Protocol through ONE Simulator. *Information Technology in Industry/Information Technology in Industry*, 9(2), 452–457. <https://doi.org/10.17762/itii.v9i2.369>
- [23] T. P. K. & R. C. S. Spyropoulos, «Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks.,» *workshop on Delay-tolerant networking*, August 2005.
- [24] Qing Shao and Y. -S. Ding, "A bio-network based custody transfer architecture for DTNs," *2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, China, 2009, pp. 428-432, doi: 10.1109/ICICISYS.2009.5358143.
- [25] F. Warthman. *Delay Tolerant Networks (DTNs)*, A Tutorial. Version 2.0, 23/07/2012
- [26] Keränen, A., Kärkkäinen, T., & Ott, J. (2010). Simulating Mobility and DTNs with the ONE (Invited Paper). *Journal of Communications*, 5(2). <https://doi.org/10.4304/jcm.5.2.92-105>

## BIBLIOGRAPHIE

- [27] Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Fall, K., Cerf, V., Durst, B., Scott, K., & Weiss, H. (2003). Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet. *IEEE Communications Magazine*, 41(6), 128–136. <https://doi.org/10.1109/mcom.2003.1204759>
- [28] Touazi, D., Mohammedi, M., Omar, M., & Bouabdallah, A. (2024). Predictive Road Optimization Strategy for Efficient Message Delivery in Delay-Tolerant Networks. Université de Béjaïa, Faculté des Sciences Exactes, Laboratoire d'Informatique Médicale.
- [29] OUARED Khaled, “ Adaptation et la simulation d’un algorithme de type DTN (Delay Tolerant Network) pour les réseaux de capteurs sans fil” Université d’Ibn Khaldoun Tiaret, 2015
- [30] N. CHARIKHI, A. FELFEL, “ Proposition d’une Extension de la Table de Routage Pour les Réseaux Tolérant aux Délais, Faculté des sciences exactes Département informatique université Abderrahmane mira Bejaia”,2015.
- [31] Yasser Kamal Hassan Mawad. Infrastructure based solutions for delay-tolerant networking. University of Lübeck Department of Computer Science, July 2020.
- [32] OULMAS Nadir, SAOUDI Aissa, “ Comparaison des protocoles Epidemic, SprayAndWait et MaxProp à l’aide du simulateur ONE”, Juin 2018.
- [33] Ilir, Shinko., Tetsuya, Oda., Evjola, Spaho., Vladi, Kolici., Makoto, Ikeda., Leonard, Barolli. A Simulation System Based on ONE and SUMO Simulators: Performance Evaluation of First Contact, Prophet and Spray-and-Wait DTN Protocols. (2015).137-142. doi: 10.1109/BWCCA.2015.60
- [34] Chong, Wang., Jiakang, Liu., Jingming, Kuang. 2. Performance Analysis on Direct Transmission Scheme under RWP Mobility Model in DTMSNs. (2011). doi: 10.1109/WICOM.2011.6040413

Nombre de Nœuds	Protocoles	Epidemic			First Contact			Max Prop			Direct Delivery			Touazi et al.		
	Métriques de Comparaison	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)
40		7.92	4356.83	43.29	8.52	3520.70	30.14	6.09	4562.60	49.41	0	4297.47	31.02	0	4217.47	32.28
80		24.96	3485.85	55.22	21.31	3764.52	31.36	13.40	3136.82	72.04	0	4107.79	32.55	0	4027.79	33.81
120		54.80	3265.19	57.36	46.27	4380.11	30.14	27.40	2134.91	82.13	0	4475.52	34.39	0	4395.52	35.65
160		104.12	2750.39	56.44	71.85	3865.22	28.61	45.06	1620.06	87.64	0	4611.03	30.41	0	4531.03	31.67
200		151.00	2452.31	57.05	98.03	4201.99	28.61	62.71	1182.60	91.00	0	4049.69	33.77	0	3969.69	35.03

Tableau 1: Résultats de Scenario 1.

Vitesse des Nœuds (m/s)	Protocoles	Epidemic			First Contact			Max Prop			Direct Delivery			Touazi et al.		
	Métriques de Comparaison	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)
0 – 3		68.00	4179.39	38.91	67.50	4683.77	13.13	45.18	3728.97	56.92	0	5008.08	15.93	0	4923.08	17.93
3 – 6		48.15	2446.35	63.94	37.47	3653.35	41.89	28.04	1419.50	89.40	0	3509.23	47.17	0	3424.23	49.17
6 – 9		43.93	2857.08	58.74	34.74	4316.29	30.90	20.85	2316.54	79.03	0	3667.75	34.62	0	3582.75	36.62
9 - 12		35.24	3664.14	52.51	32.51	4168.56	26.73	18.36	2475.07	76.42	0	4006.42	24.25	0	3921.42	26.25
12 – 15		37.97	3876.71	46.49	39.71	3714.57	18.60	20.10	3372.24	64.19	0	4309.02	20.09	0	4224.02	22.09
15 - 18		46.91	4521.63	33.94	36.48	4179.43	17.24	24.82	4467.54	50.40	0	4431.56	16.37	0	4346.56	16.37

Tableau 2: Résultats de Scenario 2.

Taille de Mémoire Tampon (Mo)	Protocoles	Epidemic			First Contact			Max Prop			Direct Delivery			Touazi et al.		
	Métriques de Comparaison	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)
5		163.63	1326.47	16.76	32.73	3565.30	30.43	25.17	2637.80	57.76	0	4125.00	29.68	0	4040.00	29.94
10		81.81	2122.07	32.62	30.84	3689.27	33.60	20.14	2505.86	76.56	0	4232.93	29.68	0	4147.93	29.94
15		62.93	2613.83	39.70	30.84	3813.19	34.82	21.40	2373.92	78.76	0	4212.90	29.19	0	4127.90	29.45
20		59.16	2881.68	40.92	30.84	3825.17	35.31	20.14	2354.00	78.76	0	4224.92	29.19	0	4139.92	29.45
25		48.46	3117.58	48.09	30.84	3805.13	35.31	20.77	2333.97	79.00	0	4236.94	29.68	0	4151.94	29.94

Tableau 3: Résultats de Scenario 3.

Time To Live (Min)	Protocoles	Epidemic			First Contact			Max Prop			Direct Delivery			Touazi et al.		
	Métriques de Comparaison	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)	Overhead Ratio	Latence Moyenne (s)	Taux de Livraison (%)
5		39.47	1663.48	47.38	50.82	1497.77	13.26	23.25	1542.93	60.93	0	1377.29	12.00	0	1292.05	13.26
80		34.78	2706.72	57.42	35.50	2299.97	24.30	18.56	2209.58	78.75	0	2571.13	20.79	0	2485.89	22.05
120		33.70	3403.46	56.92	32.98	3177.49	26.05	18.92	2288.68	79.75	0	3569.17	27.56	0	3483.93	28.82
160		34.24	3557.81	54.16	28.11	3512.65	32.58	18.92	2292.46	79.75	0	3783.78	28.06	0	3698.54	29.32
200		33.34	3456.21	54.41	26.49	3697.20	34.84	18.92	2296.20	79.75	0	4028.62	29.82	0	3943.38	31.08

Tableau 4: Résultats de Scenario 4.

## RÉSUMÉ

Les réseaux tolérants aux délais (DTN) sont des réseaux où la connectivité est intermittente en raison de facteurs environnementaux comme le climat, la mobilité ou les pannes d'énergie. Pour assurer la livraison des données malgré ces défis, une nouvelle architecture réseau a été développée. Elle ajoute une couche supplémentaire au-dessus de la couche transport, appelée **la couche bundle**. Ce protocole Bundle stocke les données jusqu'à ce qu'une occasion de transmission se présente, utilisant la technique « Store & Forward » et le concept de transfert de garde. Contrairement aux protocoles classiques qui cherchent à trouver le chemin le plus court, les protocoles de routage dans les DTN visent à augmenter le taux de livraison des données. Ils utilisent principalement deux approches : la « réplication », qui duplique les messages dans le réseau pour augmenter la probabilité de transmission, et la « connaissance », qui collecte des informations sur l'état du réseau pour gérer les envois efficacement. Cependant, ces protocoles rencontrent souvent des obstacles liés à la consommation des ressources, notamment l'espace de stockage dans les buffers. L'étude comparative menée par simulation entre les performances des protocoles Epidemic, maxprop, first contact et direct delivery en termes de ratio de surcharge, de latence moyenne et de taux de livraison. Les simulations, réalisées avec le simulateur ONE et basées sur des scénarios variés, montrent que MaxProp se distingue par son efficacité globale, offrant un taux de livraison élevé et une faible latence grâce à ses mécanismes avancés de gestion des files d'attente et de priorisation des messages.

***Mots clés :** Réseaux Tolérants aux Délais, DTN, Connectivité Intermittente, Store & Forward, protocoles de routage DTN, Epidemic routing.*

## ABSTRACT

Delay-tolerant networks (DTNs) are networks where connectivity is intermittent due to environmental factors such as climate, mobility, or power outages. To ensure data delivery despite these challenges, a new network architecture has been developed. It adds an additional layer above the transport layer, called **the bundle layer**. This bundle protocol stores data until an opportunity for transmission arises, using the "Store & Forward" technique and the custody transfer concept. Unlike traditional protocols that seek the shortest path, routing protocols in DTNs aim to increase the data delivery rate. They mainly use two approaches: "replication," which duplicates messages in the network to increase the probability of transmission, and "knowledge," which collects information about the network's state to manage transmissions efficiently. However, these protocols often encounter resource consumption issues, particularly regarding storage space in buffers. A comparative study conducted through simulations evaluated the performance of the Epidemic, MaxProp, First Contact, and Direct Delivery protocols in terms of overhead ratio, average latency, and delivery ratio. The simulations, performed with the ONE simulator and based on various scenarios, show that MaxProp stands out for its overall efficiency, offering a high delivery ratio and low latency thanks to its advanced queue management and message prioritization mechanisms.

***Key words:** Delay Tolerant Networks, DTN, Intermittent Connectivity, Store & Forward, Epidemic routing.*