

Chapitre 4

Les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

4.1. Introduction

Le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné. Le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance.

Les protocoles de routage au sein des RCSF sont influencés par un facteur déterminant à savoir : la minimisation de la consommation d'énergie sans une perte considérable de l'efficacité. Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud joue le rôle de source et de relais. De ce fait, la défaillance énergétique d'un capteur peut changer significativement la topologie du réseau et imposer une réorganisation coûteuse de ce dernier. Dans ce chapitre on va mettre en évidence quelques protocoles de routages et leurs classifications.

4.2. Les défis du routage dans les RCSF

La consommation d'énergie: du fait des ressources énergétiques limitées dans les capteurs sans fil, la gestion de la consommation de l'énergie est le défi principal des protocoles de routage. La consommation d'énergie dans le cadre du routage peut être l'effet d'une recherche de voisinage ou d'un traitement de paquet ou de sa transmission.

Extensibilité: dans les réseaux à grande densité de nœuds, l'information sur la position de chaque nœud peut être difficile à accéder. Par conséquent, il est nécessaire de développer des protocoles de routage où l'information sur la topologie n'est plus nécessaire. Les nœuds doivent donc supporter des informations de la part d'un grand nombre de nœuds sans entrave à la consommation énergétique.

Adressage: les mécanismes d'adressage facilitent la communication entre les voisins. Cependant, lorsque le nombre de nœuds est important, l'information nécessite une communication multi-hop (plusieurs intermédiaires). Ceci provoque un phénomène de saturation dû à la juxtaposition des adresses des intermédiaires. Les protocoles de routage doivent donc supporter des mécanismes de prévention contre la saturation (Overhead) où l'adresse de chaque nœud n'est pas requise.

Robustesse: Au cours du routage, un nœud peut subir une panne et empêcher le déroulement de ce processus. Les protocoles de routage doivent supporter des mécanismes de gestion de ce genre d'imprévus qui sont dus au canal ou aux composants du capteur, et ainsi de ne pas affecter l'efficacité du routage lors d'une perte de paquet.

Topologie: le déploiement des capteurs peut se faire de façon prédéfinie ou, plus souvent de façon complètement aléatoire. Généralement, les capteurs ne connaissent pas la topologie et donc la position de leurs voisins, ce qui affecte directement les performances du routage. Les protocoles de routage doivent donc supporter des méthodes de découverte de voisinage et de son entretien afin de fournir à chaque nœud une connaissance de la topologie qui l'entoure; surtout s'il existe des nœuds mobiles, ce qui est le cas pour certains réseaux sans fil.

Application: le type de la couche d'application influence directement le choix du protocole de routage. Dans les applications de contrôle d'un processus quelconque, les capteurs transmettent des informations à la destination de façon périodique, ce qui nécessite généralement des routes statiques. Dans les applications basées sur les événements, le capteur est souvent en mode veille. À l'arrivée du premier événement, une route doit être établie pour délivrer l'information.

4.3. Classification des protocoles de routage dans les RCSF

Les protocoles de routage pour les RCSF ont été largement étudiés, et différentes études ont été publiées. Les méthodes employées peuvent être classifiées suivant plusieurs critères comme illustré sur la figure suivante :

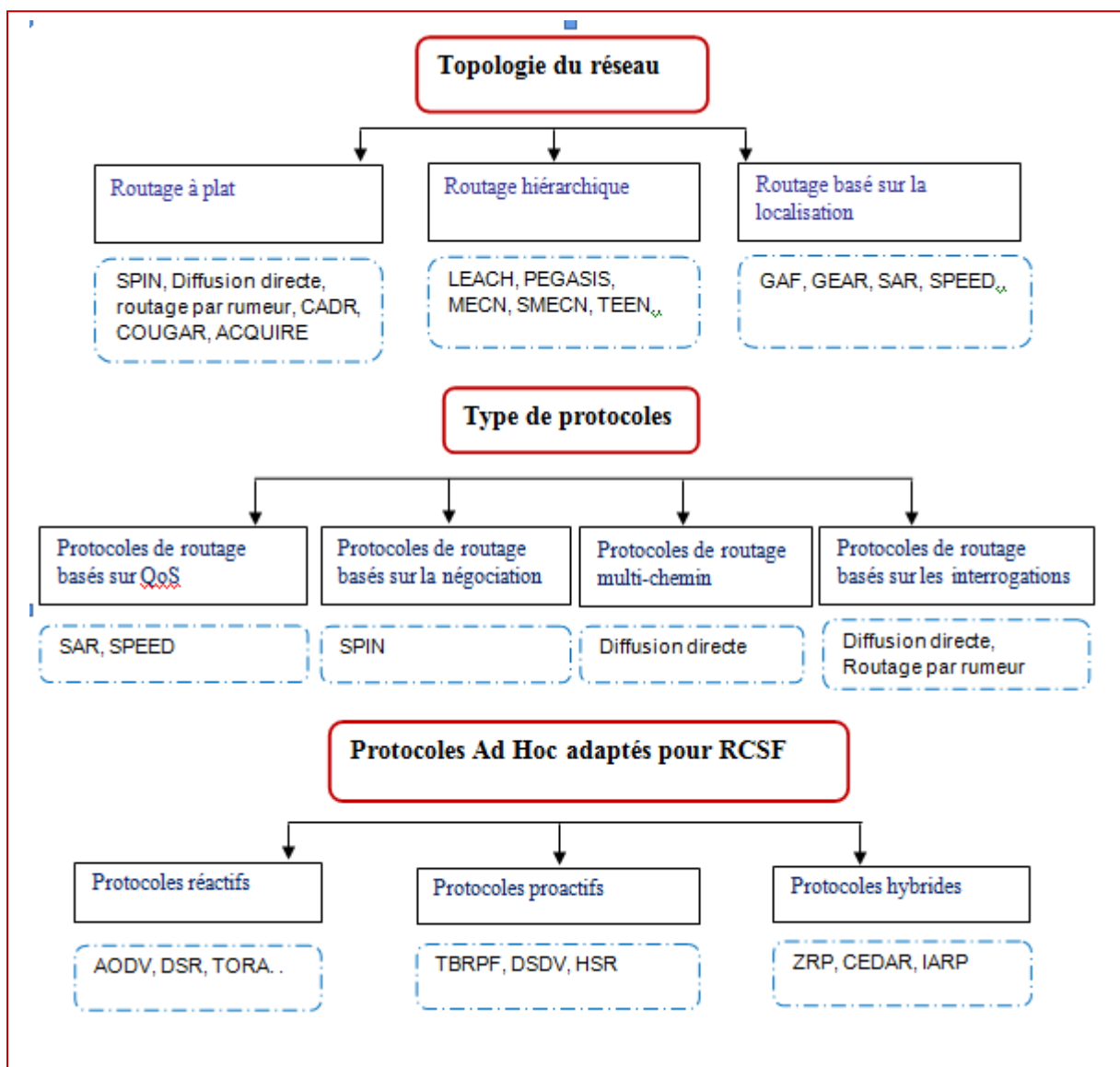


Figure 4.1 :Classification des protocoles de routage dans les RCSF

4.3.1. Routage hiérarchique

Dans le routage hiérarchique, le réseau est partitionné en groupes appelés "clusters". Un cluster est constitué d'un chef (cluster-head) et de ses membres. Le cluster-head collecte et agrège les données et vérifie si les données collectées ne sont pas redondante avant de les envoyer au sink. Cela permet d'économiser l'énergie en minimisant le nombre de messages transmis à la destination. LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical) est l'un des premiers protocoles de routage pour les réseaux de capteurs.

4.3.2. Routage basé sur la localisation

Dans le routage basé sur la localisation, le routage est effectué en utilisant l'emplacement des nœuds. Selon la force des signaux entrants, il est possible de calculer la distance du nœud voisin le plus proche. Ils permettent la transmission directionnelle de l'information en évitant l'inondation d'information dans l'ensemble du réseau. Par conséquent, le coût de contrôle de l'algorithme est réduit et le routage est optimisé. De plus, avec la topologie réseau basée sur des informations de localisation de nœuds, la gestion du réseau devient simple.

4.3.3. Routage plat

Dans les protocoles de routage plats, tous les nœuds jouent le même rôle. Chaque nœud distribue des données à d'autres nœuds qui se trouvent dans leurs rayons de transmission. L'utilisation du lien de transmission diffère d'un protocole à un autre.

4.3.4. Protocoles de routage multi-chemins

Ces protocoles sont efficaces pour la gestion de plusieurs chemins. Les nœuds envoient les données collectées sur plusieurs liens au lieu d'un seul. Cela permet une bonne fiabilité et une bonne tolérance aux pannes dans le réseau car il existe un chemin alternatif lorsque le chemin primaire échoue.

4.3.5. Protocoles de routage basés sur les interrogations

Le routage basé sur les interrogations propage les requêtes émises par la station de base. La station de base envoie des requêtes demandant certaines informations des nœuds du réseau, le nœud, qui est responsable de la détection et de la collecte des données, lit ces requêtes et s'il y a égalité avec les données demandées dans la requête commencent à envoyer les données à la station de base.

4.3.6. Protocoles de routage basés sur la négociation

Ces protocoles utilisent des descripteurs de haut niveau codés en haut niveau afin d'éliminer la transmission des données redondantes. Chaque nœud effectue un suivi de la consommation de ses ressources ce qui influence ses décisions lors des négociations. Les négociations se font à travers des paquets d'avertissement, de requête et de données.

4.3.7. Protocoles de routage basés sur la qualité de service

Dans ce type de protocole de routage, la qualité de service et l'énergie consommée doivent être maintenues dans le réseau. Chaque fois que le puits demande des données des nœuds dans le réseau, la transmission des données doit satisfaire certains paramètres de qualité de service, tels que, la latence (les données doivent être envoyées dès qu'elles sont détectées) et la bande passante consommée. Le protocole SAR (Sequential Assignment Routing) est l'un des premiers protocoles qui assure la qualité de service dans les réseaux de capteurs.

4.3.8. Protocoles réactifs

Ce sont des protocoles qui calculent la route sur demande avant d'effectuer le routage et n'ont pas besoin de connaître la topologie du réseau ou d'échanger périodiquement des informations sur le routage. L'aspect « sur demande » du routage élimine la nécessité de mettre à jour la route, mais augmente le délai de démarrage du routage à cause du temps de découverte de la route. Plusieurs protocoles ont été développés dans cette catégorie, on peut citer l'AODV, le DSR, TORA..

4.3.9. Protocoles proactifs

Les protocoles proactifs effectuent un calcul de toutes les routes possibles avant d'effectuer le routage. Les nœuds maintiennent une information sur la topologie du réseau sous forme de tables de routage, et ce, de façon périodique ou suite à un évènement. Ce genre de protocoles consomme beaucoup de ressources du réseau, du fait de la connaissance préalable de la topologie. Il existe plusieurs protocoles proactifs, tels que, le TBRPF , DSDV et le HSR.

4.3.10. Protocoles hybrides

À chaque fois qu'un nœud a besoin de router une information, d'abords, calcule toutes les routes possibles avec la méthode proactive ensuite s'adapte pendant le routage avec la méthode réactive.

4.4. Étude détaillée des protocoles de routage

4.4.1. LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical)

LEACH est l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des clusters-heads locaux comme passerelle pour atteindre la destination. Cela permet d'économiser de l'énergie car les transmissions ne sont effectuées que par les cluster-head plutôt que par tous les nœuds de capteurs.

Le protocole se déroule en rounds. Chaque round se compose de deux phases : construction et communication.

- **Phase de construction**

Le but de cette phase est la construction des clusters en choisissant les chefs et en établissant la politique d'accès au média au sein de chaque groupe. Cette phase

commence par la prise de décision locale pour devenir cluster-head. Chaque nœud n choisit un nombre aléatoire, si ce nombre est inférieur à une valeur $T(n)$, le nœud devient cluster-head. $T(n)$ est défini comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{Si } n \in G \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (1)$$

Avec :

- P : pourcentage désiré de cluster-heads pendant un round.
- r : numéro du round.
- G : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élu cluster-heads pendant les $1/P$ rounds précédents.

Par la suite, chaque nœud qui s'est élu cluster-head émet un message de notification. Les nœuds membres récoltent les messages de notification, et décident leur appartenance à un cluster. La décision est basée sur l'amplitude du signal reçu : le cluster-head ayant le signal le plus fort est choisi (i.e. le plus proche). En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi. Chaque membre informe son chef de sa décision. Toutes les communications précédentes étant faite dans une topologie plate, la méthode CSMA doit être employée. Par la suite, les communications au sein d'un cluster peuvent être faites avec la méthode TDMA. Pour cela, chaque chef établie un Schedule TDMA pour ses membres, en indiquant pour chaque nœud son slot d'émission. Ce Schedule est envoyé aux membres.

- **Phase de communication**

En utilisant le schedule TDMA, les membres émettent leurs données captées pendant leurs propres slots. Cela leur permet d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots réservés, afin d'économiser leur énergie. Ces informations sont ensuite agrégées, pour être transmises au collecteur (sink). Cette communication, entre un cluster-head et le collecteur, se fait d'une manière directe, i.e. : le cluster-head adapte son émetteur radio afin d'atteindre directement le collecteur.

4.4.2. Les Protocoles TEEN et APTEEN

En utilisant TDMA, le protocole LEACH est destiné aux applications time-driven. Dans ce type d'application, la donnée est propagée d'une manière périodique. Cependant, ce genre de protocole est inadapté pour les applications event-driven, où un comportement réactif est nécessaire pour le bon fonctionnement du système. TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) a été développé pour modeler LEACH afin de répondre aux exigences des applications event-driven.

TEEN est conçu pour être sensible à des changements soudains des attributs tels que la température. La réactivité est importante pour les applications critiques dont le réseau fonctionne dans un mode réactif. L'architecture du réseau de capteurs est basée sur un groupement hiérarchique où les nœuds forment des clusters et ce processus va se répéter jusqu'à ce que la station de base soit atteinte.

La majorité du comportement de TEEN est semblable au protocole LEACH. Cependant, quelques différences existent. Les chefs élus ne transmettent pas un schedule TDMA, mais émettent un message contenant les informations suivantes :

- Attributs : représentent la tâche demandée au capteur.
- Hard threshold (HT) : détermine la valeur critique après laquelle les membres doivent envoyer leur rapports de données.
- Soft threshold (ST) : spécifie le changement minimal obligeant le nœud à envoyer un nouveau rapport.

Donc, lorsqu'un nœud s'aperçoit que la valeur captée a dépassé HT, il doit émettre un rapport au chef. Il ne réémet un nouveau rapport que si la valeur change radicalement, i.e. : la différence dépasse ST. Ce mécanisme permet d'implémenter un comportement réactif, tout en limitant le nombre de messages utilisés

APTEEN est une extension de TEEN qui fait à la fois la collection des captures périodique de données et qui réagit aux événements critiques. Quand la station de base forme des clusters, les clusters head diffusent les attributs, les valeurs des seuils, ainsi que le calendrier de transmission à tous les nœuds. Le cluster-head effectue également l'agrégation de données afin d'économiser l'énergie.

4.4.3. Le protocole de routage « GAF »

GAF (Geographic Adaptive Fidelity) est un protocole de routage basé sur la localisation des nœuds. Il est conçu principalement pour les réseaux mobiles ad hoc, mais peut être applicable aux réseaux de capteurs. La localisation des nœuds dans GAF pourrait être fournie à l'aide d'un GPS ou d'autres techniques de localisation. Il consiste à former des grilles virtuelles de la zone concernée en partitionnant cette zone où les nœuds sont déployés en de petites zones telles que, pour deux grilles adjacentes G_x et G_y , tous les nœuds de G_x peuvent communiquer avec tous les nœuds G_y . Ainsi, ce système de partitionnement GAF assure la fidélité du routage car il existe au moins un chemin entre un nœud et la station de base. GAF peut augmenter considérablement la durée de vie du réseau. En effet, un seul nœud dans chaque grille reste à l'état actif en faisant passer les autres nœuds de la grille à l'état de sommeil pour une certaine période de temps tout en assurant la fidélité du routage. Cependant, dans certains environnements où les nœuds sont fortement mobiles, la fidélité du routage pourrait être réduite si un nœud actif quitte la grille. Ainsi, le nombre de données perdues sera important

4.4.4. Le protocole SPIN

Heinzelman et al. ont proposé une famille de protocoles appelée SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), reposant sur un modèle de négociation afin de propager l'information dans un réseau de capteurs. Le but de SPIN est de pallier aux problèmes de l'inondation, qui sont :

- L'implosion due à la duplication inutile des réceptions d'un même message.
- Le chevauchement lié au déploiement dense des capteurs. En utilisant l'inondation, les capteurs d'une zone émettent tous la même donnée (ou presque).
- L'ignorance des ressources, car l'inondation ne prend pas en considération les ressources des nœuds.

Ces trois problèmes affectent grandement la durée de vie et les performances du réseau. Pour les résoudre, SPIN adopte deux principes :

- La négociation : pour éviter le problème d'implosion, SPIN précède l'émission d'une donnée par sa description, en utilisant la notion de méta-données. Le récepteur aura le choix par la suite d'accepter la donnée ou non. Ce mécanisme permet aussi de régler le problème de chevauchement.
- L'adaptation aux ressources : d'une manière continue, les nœuds contrôlent leur niveau d'énergie. Le protocole SPIN accommode son exécution suivant l'énergie restante du capteur, et modifie en conséquence le comportement du nœud.

4.4.3.1 Fonctionnement de SPIN

Les communications dans SPIN se font en trois étapes :

- Lorsqu'un nœud veut émettre une donnée, il émet d'abord un message ADV contenant une description de la donnée en question.
- Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin.
- En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA.

4.4.4. La diffusion dirigée

L'idée vise à diffuser des données aux nœuds en utilisant un schéma de nommage pour les données. La raison principale derrière l'utilisation d'un tel système est de se débarrasser des opérations inutiles de routage de couche réseau afin d'économiser l'énergie. La diffusion dirigée suggère l'utilisation de paires attribut-valeur pour les données et les requêtes des capteurs. Afin de créer une requête, un nœud est défini à l'aide d'une liste de paires attribut-valeur comme le nom des objets, l'intervalle, la durée, la zone géographique, etc. Un paquet est diffusé par ce nœud vers la destination à travers ses voisins. Chaque nœud qui reçoit les paquets peut les stocker pour une utilisation ultérieure. Les paquets stockés sont ensuite utilisés pour comparer les données reçues. La requête contient aussi plusieurs champs de

gradient. Un gradient est un lien réponse avec un voisin dont le paquet a été reçu et qui est caractérisé par le débit, la durée et la date d'expiration de données. Ainsi, en utilisant les intérêts et les gradients, les routes sont établies entre la destination et les sources. Plusieurs routes peuvent être établies de telle sorte que l'une d'elle est choisie par renforcement. La destination renvoie le message d'intérêt initial à travers la route choisie. Un intervalle plus petit renforce donc le nœud source sur ce chemin pour envoyer des données plus fréquemment.

4.4.5. Routage par rumeur

Le routage par rumeur est principalement destiné pour des applications où le routage géographique n'est pas faisable. En général, la méthode (diffusion dirigée) utilise l'inondation pour envoyer la requête à l'ensemble du réseau où il n'y a pas de critère géographique pour diffuser les tâches. Toutefois, dans certains cas, peu de données sont demandées par les nœuds, donc l'utilisation d'inondation est inutile. L'idée clé de cette méthode est de trouver les routes pour les requêtes vers les nœuds qui ont observé un événement particulier, plutôt que d'inonder tout le réseau pour récupérer des informations sur les événements survenus. Afin de diffuser un événement sur le réseau, l'algorithme de routage par rumeur emploie des paquets appelés agents. Quand un nœud détecte un événement, il ajoute cet événement à sa table locale, appelée table d'événements et génère un agent. Cet agent parcourt le réseau afin de propager des informations sur des événements locaux pour les nœuds distants. Quand un nœud génère une requête pour un événement, les nœuds qui connaissent le chemin, répondent à la requête en inspectant leur table événement. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'inonder tout le réseau, ce qui réduit le coût de communication. D'autre part, ce routage n'utilise qu'un seul chemin entre la source et la destination au lieu de la diffusion dirigée où les données peuvent être acheminées par des routes multiples.

4.4.6. Protocole SPEED

Le protocole de routage SPEED est l'un des rares protocoles qui prend en compte la contrainte du délai de bout en bout. SPEED est basé sur le routage géographique mais il définit la notion de la vitesse. La vitesse avec laquelle un paquet doit progresser vers sa destination avant l'échéance qui est la vitesse de référence. Au lieu d'utiliser la distance géométrique comme la métrique du routage, SPEED utilise la vitesse comme la métrique du routage. Un chemin qui propose une vitesse supérieure ou égale à la vitesse de référence permet alors de garantir que le délai de bout en bout est inférieur ou égal à la contrainte sur l'échéance. Afin d'équilibrer la charge et la consommation de l'énergie, SPEED permet de choisir de façon probabiliste un chemin parmi un ensemble de chemins qui offrent tous une vitesse supérieure à celle de référence.

Pour accomplir ses tâches, SPEED repose sur l'interopérabilité de plusieurs modules comme illustre sur la figure 4.2. Base sur les informations locales contenues dans la table de voisinage, ainsi que sur la position et l'identifiant (ID) du Sink S .

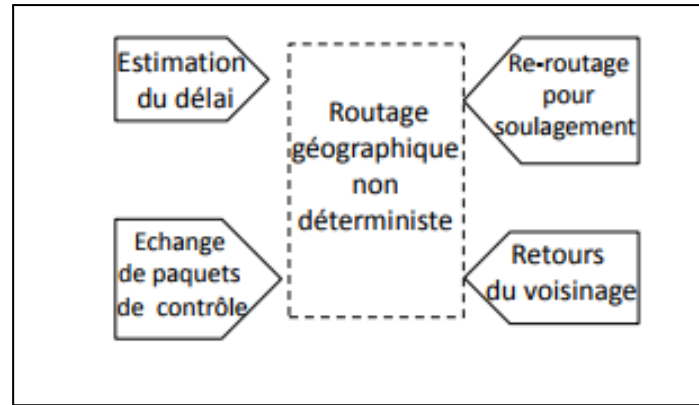


Figure 4.2. Module du protocole SPEED

Chaque nœud i détermine le prochain saut j grâce au module de routage géographique non déterministe « Non-deterministic Geographic Forwarding » (NGF). Dans ce module majeur, le nœud i débute par établir l'ensemble de nœuds relais « Forwarding Set » (FS) $FS_i(S)$, qui représente un sous-ensemble de l'ensemble des nœuds voisins « Neighbor Set » (NS) NS_i contenant les nœuds j plus proches de la destination S que le nœud i .

Formellement, $FS_i(S) = \{j \in NS_i / \text{dist}(i, S) - \text{dist}(j, S) > 0\}$, où $\text{dist}(i, S)$ et $\text{dist}(j, S)$ sont les distances Euclidiennes entre i et S , j et S respectivement. Si $FS_i(S)$ n'est pas vide, le nœud i calcule la vitesse de progression du paquet vers la destination S pour chaque nœud j de $FS_i(S)$ par l'équation suivante :

$$Speed_{ij}(S) = \frac{\text{dist}(i,S) - \text{dist}(j,S)}{\text{Délai}_{ij}} \quad (4.1)$$

Ensuite, le nœud i divise $FS_i(S)$ en deux sous-ensembles. Dans un sous-ensemble nommé

$FS_i \text{ Inf}(S)$ (resp. $FS_i \text{ Sup}(S)$), le nœud i met les nœuds j ayant $Speed_{ij}(S)$ inférieure (resp. supérieure) à $SetSpeed$. Ensuite, pour chaque nœud de $FS_i \text{ Sup}(S)$, la probabilité d'être choisi est calculée selon une loi exponentielle discrete par l'équation (4.2) :

$$p(x = j) = \frac{Speed_{ij}(S)^r}{\sum_{i=1}^N Speed_{il}(S)^r} \quad (4.2)$$

où N est la taille de $FS_i \text{ Sup}(S)$ et $0 < r < 1$. Une grande valeur de r conduit à un délai de bout-en-bout plus court, tandis qu'une valeur plus petite atteint un meilleur équilibre de charge. Le nœud j avec la plus grande probabilité est le prochain saut.