

Routage prenant en compte les contraintes de délai dans les réseaux MANETs



Zoubir Mammeri
IRIT – UPS



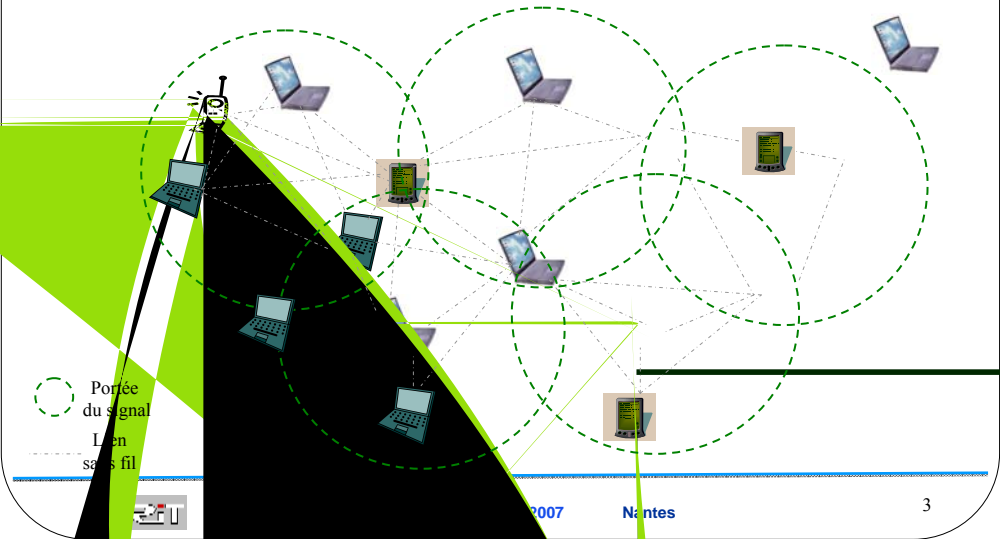
ETR'2007
Nantes, 3-7 septembre 2007

Plan

1. Sur les MANETs
 - Caractéristiques
 - Challenges
2. Routage *Best effort* dans les MANETs
 - Approches
 - Présentation de quelques protocoles
3. Routage à QoS dans les MANETs
 - Problèmes, approches
 - Présentation de quelques protocoles
4. Conclusion

1. Sur les MANETS

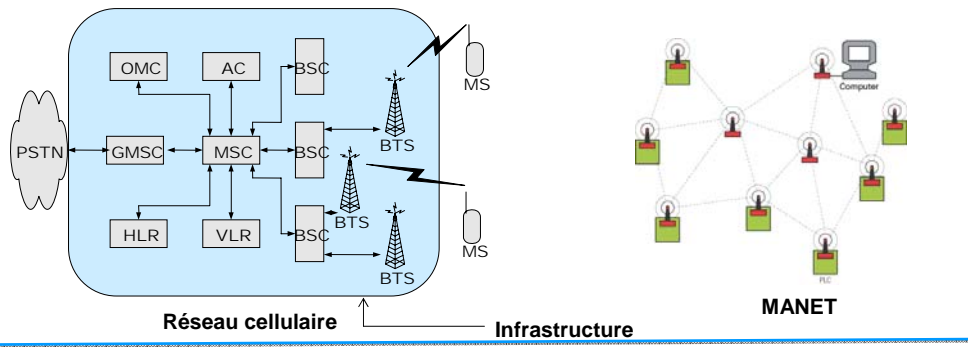
MANET : Mobile Ad hoc NETWORK



1. Sur les MANETS

MANETs vs. Réseaux cellulaires

- Route à N sauts vs. route à 1 saut
Dans un MANET, chaque nœud est un "routeur"
- Autonomie vs. Administration centralisée
Les MANETs sont *self-creating*, *self-organizing*, et *self-administering*



1. Sur les MANETs

Domaines d'utilisation des MANETs

- Partout où il n'y a pas d'infrastructure
- Usages personnels
 - Téléphone, oreillette, laptop...
- Environnements militaires/champs de bataille
 - Soldats, chars, avions de chasse
- Environnements civils
 - Réseau de taxi, de bateaux, petits avions
 - Salles de conférence, Campus universitaires
 - Stades, Espaces de jeu...
- Interventions d'urgence
 - Recherche et secourisme, SAMU
 - Police, pompiers



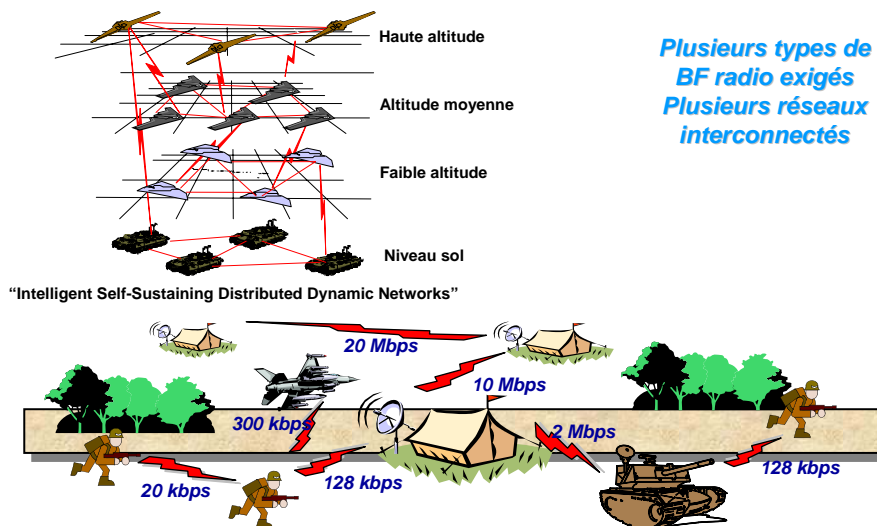
ETR'2007

3-7 Septembre 2007

Nantes

5

Domaines d'utilisation des MANETs



ETR'2007

3-7 Septembre 2007

Nantes

6

1. Sur les MANETs

Limites des MANETs

- ▶ **Limites des réseaux sans fil**
 - Pertes de paquets dues aux erreurs de transmission
 - Variabilité de la capacité des liens
 - Bande passante limitée
 - Déconnexions/partitionnements fréquents
 - Sécurité (diffusion totale !)
- ▶ **Limites dues à la mobilité**
 - Topologies/routes changeant dynamiquement
 - Manque de prise en compte de la mobilité par les applications/systèmes (transparence)
- ▶ **Limites dues aux équipements/ordinateurs mobiles**
 - Durée de batterie limitée
 - Capacités (calcul et stockage) limitées

Difficultés/
impossibilité de
réservation de
ressources

Garantie de QoS !!!



1. Sur les MANETs

Travaux et Challenges

- ▶ Protocoles MAC
- ▶ Routage (unicast, multicast)
- ▶ QoS, Réserve de ressources
- ▶ Modèles de mobilité
- ▶ Gestion et prédiction de la mobilité
- ▶ Localisation des serveurs
- ▶ Consommation d'énergie
- ▶ Couche transport pour MANETs
- ▶ Modèles de simulation de MANETs
- ▶ Méthodes d'auto-configuration
- ▶ Conception « cross-layer »
- ▶ Sécurité
- ▶ Connexion avec d'autres réseaux
- ▶ Antennes ("smart antennas")
- ▶ ...

Des milliers
d'articles
1995-2006



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

Routage dans le cas général (1/2)

■ Énoncé du problème

Étant donné une source S , une destination D , les vecteurs-poids associés aux arcs W , un vecteur de besoins de B , trouver un chemin p de S à D tel que : les contraintes B sont satisfaites et un coût C est optimisé.

■ Fonctions

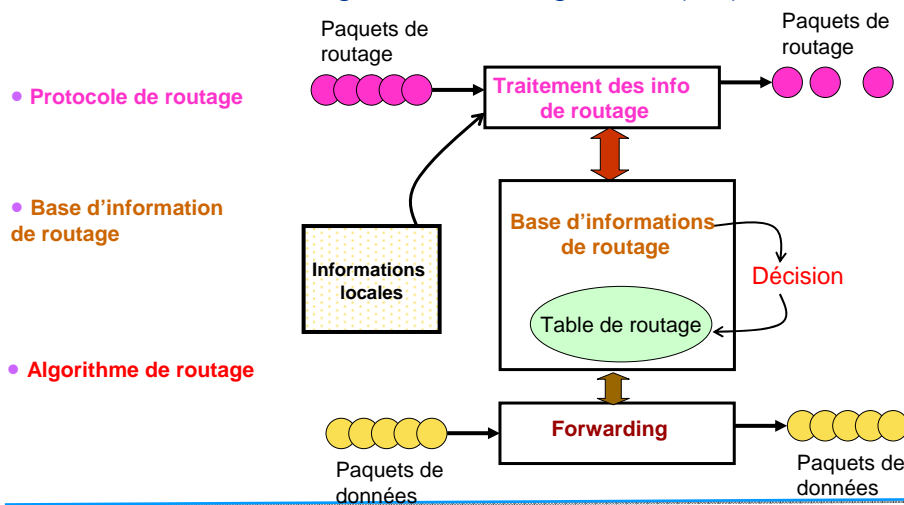
1. Collection des informations sur l'état du réseau (fonction **vitale et complexe**)
 - Vecteur de distance (distance vector routing)
 - Etat de lien (link state routing)
2. Recherche du **meilleur chemin**
3. Maintenance : changement en cas de panne/anomalie

Avec : Optimisation des ressources



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

Routage dans le cas général (2/2)



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

Propriétés d'un routage idéal

- ▶ **Totalement distribué** (tolérance aux fautes)
- ▶ **Délai minimal pour la sélection de route** (sélection instantanée)
- ▶ **Convergence vers la solution optimale**

- ▶ **Maintenance de route impliquent un minimum de nœuds**
- ▶ **Reconfiguration rapide** : adaptation aux différents changements de topologies
- ▶ **Fraîcheur des informations d'état stockées** (vue précise et instantanée)
- ▶ **Surcoût minimal** (peu calcul, peu de paquets de contrôle, peu d'infos stockées)
- ▶ « Scalability »
- ▶ **Utilisation optimale des ressources du réseau**

- ▶ **Capacités à offrir de la QoS**
- ▶ **Sécurité et vie privée**



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

Orientations des travaux

- **Routage *Best effort***
- **Routage à QoS**
- **Routage avec optimisation de l'énergie**
- **Routage et sécurité**
- **Modèles de mobilité**
- **Modèles de simulation et analyse**



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

Protocoles de routages pour MANETs

- ▶ **Beaucoup de propositions**
 - Algorithmes de base (originaux) : moins d'une dizaine
 - Leurs extensions : des dizaines

- ▶ **Aucun protocole n'est parfait**
 - Tailles variables : Petits (2-100), Moyens-larges (100-10000), très grands (10000 à des millions)
 - Besoins différents : débit, délai, disponibilité, sécurité, énergie...

- ▶ **Le groupe MANET de l'IETF n'a publié que quatre RFC**
 - Directives générales (RFC 2501 – Janvier 1999)
 - AODV (RFC 3561 – Juillet 2003)
 - OLSR (RFC 3626 – Octobre 2003)
 - DSR(RFC 4728 – Mai 2007)



2. Routage Best effort dans les MANETs

DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) routing

- Un des premiers protocoles proposés pour les réseaux ad hoc [Perkins 1994]
- Protocole proactif
- Basé sur l'algorithme de Bellman-Ford
- Chaque nœud a une table de routage pour chaque destination :
 - longueur du chemin le plus court
 - adresse du premier saut vers la destination
 - numéro de séquence associé à la destination
- Échange périodique de tables de routage
- Lorsqu'un nœud reçoit une table de routage d'un autre nœud, il vérifie le numéro de séquence de la table reçue pour savoir s'il faut la prendre en compte ou l'ignorer.

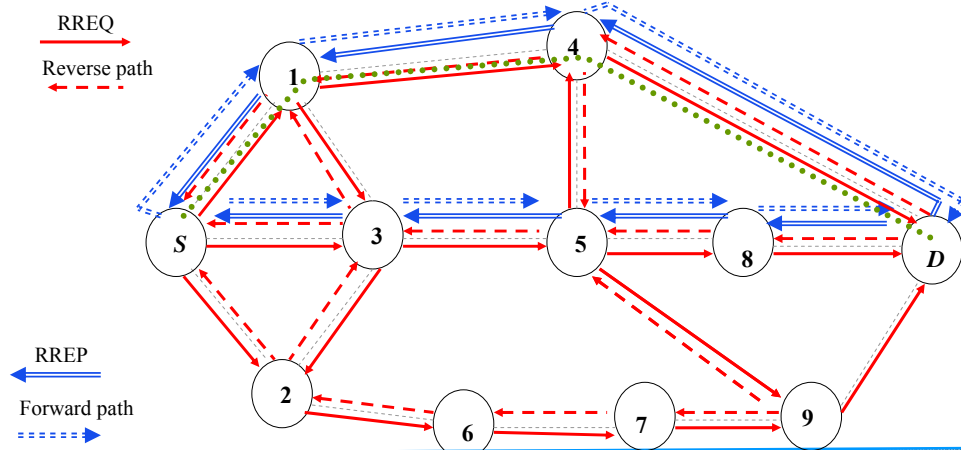
Nombre de
paquets de
contrôle élevé



2. Routage Best effort dans les MANETs

AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) – [Perkins 1999]

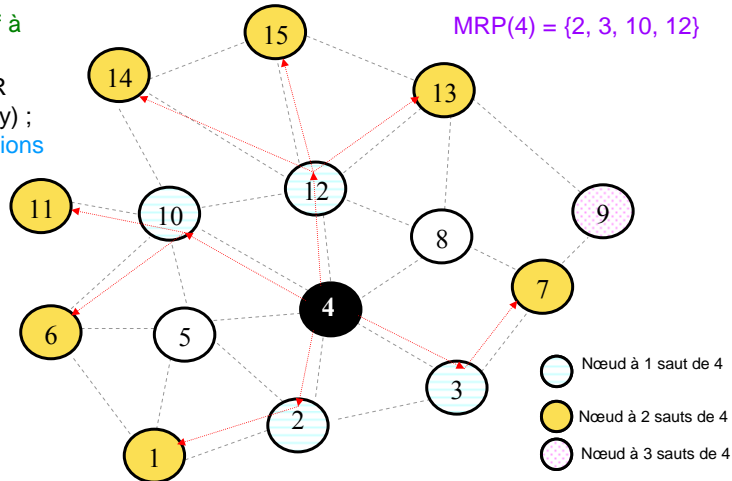
- Protocole réactif ; réduit les diffusions



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

OLSR (Optimized Link State Routing) - [Clausen et al. 2001]

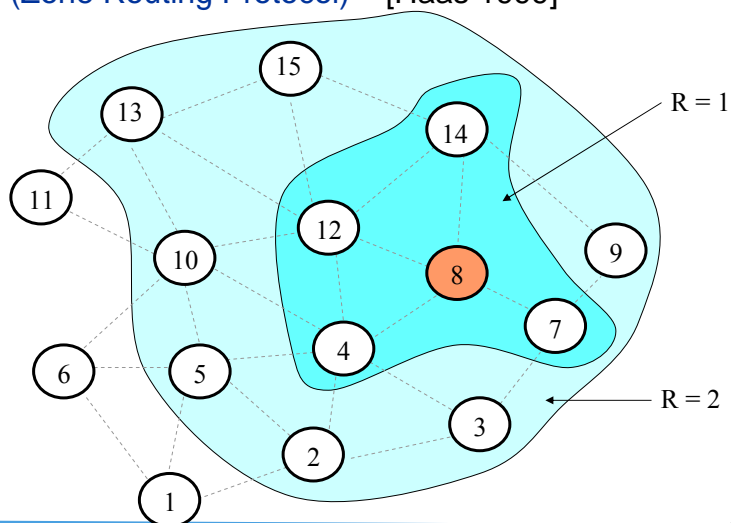
- Protocole proactif à état de lien
- Basé sur les MPR (MultiPoint Relay) ; Réduit les diffusions



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

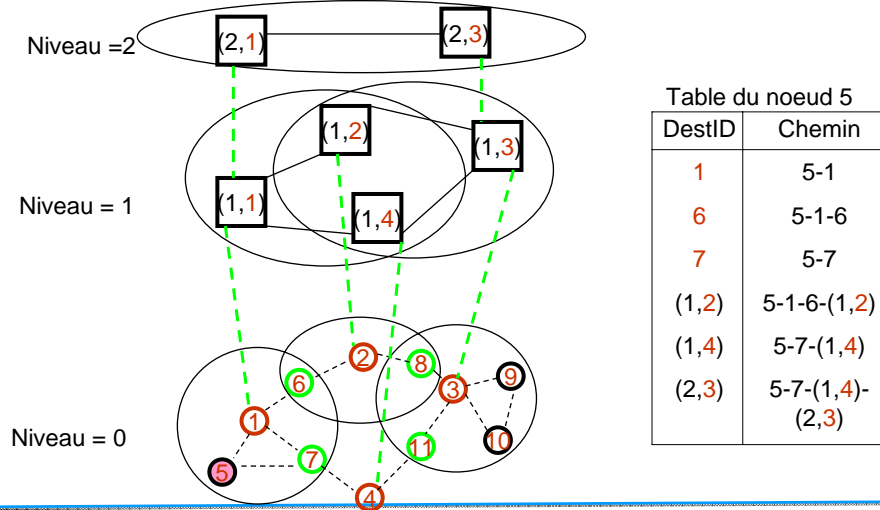
ZRP (Zone Routing Protocol) – [Haas 1999]

- Protocole hybride
- Protocole proactif en intra-zone
- Protocole réactif en inter-zones



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

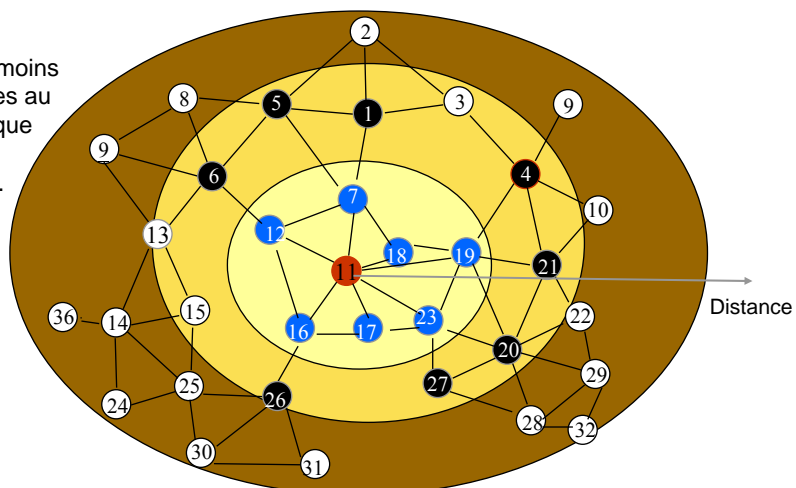
Protocole hiérarchique – HSR (Hierarchical State Routing)



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

Protocole hiérarchique - FSR (Fish eye State Routing)

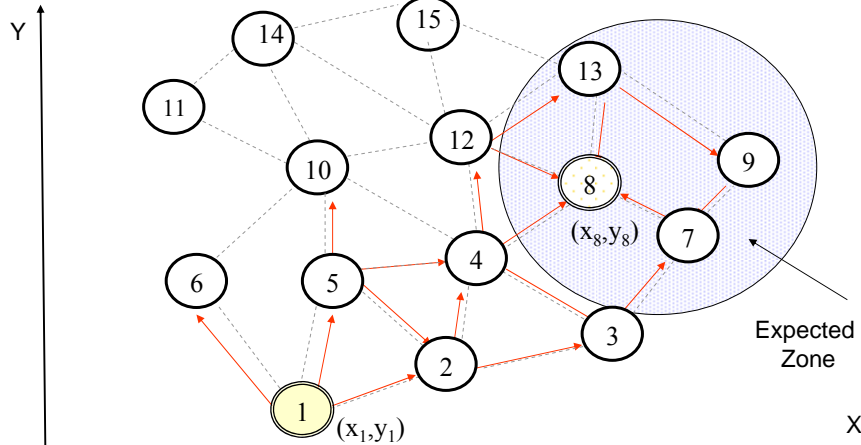
- Maintenir des informations de moins en moins précises au fur et à mesure que l'on s'éloigne du nœud considéré.



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

Protocole LAR (Location-Aided Routing) – [Ko 2000]

- Connaissance de localisation → Meilleure redirection des requêtes



2. Routage *Best effort* dans les MANETs

Débat Réactifs contre Proactifs !!!!!

- En général : actuellement pas de gagnant clair
- Réactif ou Proactif : dépend du contexte
 - ◆ Diversité des flux (Nombre moyen de sources, durées des flux...),
 - ◆ Mobilité des nœuds
 - ◆ Contraintes de QoS, énergie



3. Routage à QoS dans les MANETs

Notion de la QoS

■ Métriques de QoS

- Bande passante
- Aspects temporels (décalage de transfert, gigue...)
- Taux d'erreurs, taux de perte
- Disponibilité/robustesse
- Coût
- Autres (batterie, espace mémoire,...)

■ Niveaux/classes de QoS

- Meilleur effort
- Probabiliste/stochastique/statistique (soft QoS)
- Garantie absolue (hard QoS)



3. Routage à QoS dans les MANETs

Types de métriques de QoS

■ Métrique additive

- $QoS(C_1 ; C_2) = QoS(C_1) + QoS(C_2)$
- ex. Délai

■ Métrique multiplicative

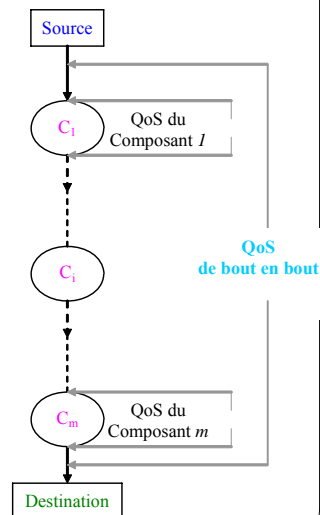
- $QoS(C_1 ; C_2) = QoS(C_1) * QoS(C_2)$
- ex. Disponibilité

■ Métrique concave

- $QoS(C_1 ; C_2) = \min\{QoS(C_1), QoS(C_2)\}$
- ex. Débit

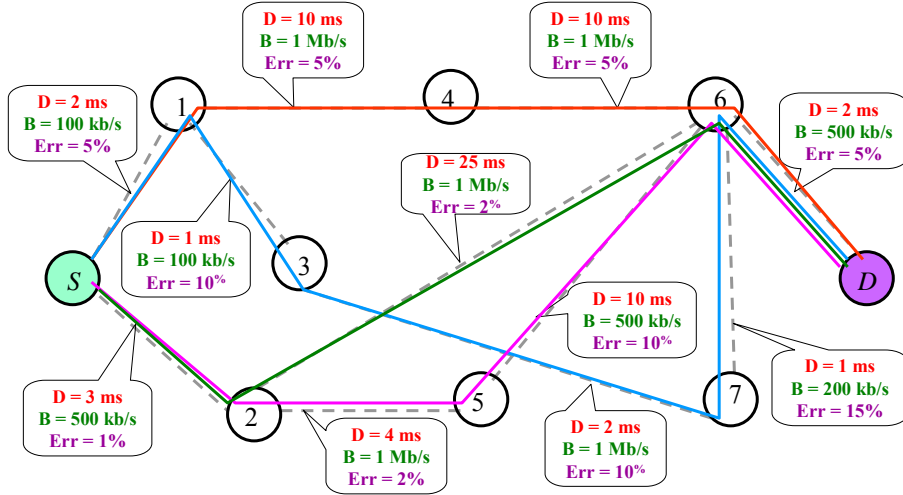
■ Autres

- Cas des spécifications non homogènes



3. Routage à QoS dans les MANETs

Exemple de chemins à QoS (1/2)



Chemin	Nbre de sauts	Délai e2e	BP e2e	Taux d'erreur e2e
S → 1 → 4 → 6 → D	4	24 ms		
S → 1 → 3 → 7 → 6 → D	5	8 ms		
S → 2 → 5 → 6 → D	4	8 ms 19 ms		
S → 2 → 6 → D	3			



3. Routage à QoS dans les MANETs

Problèmes de routage à QoS

→ Problèmes de satisfaction de contraintes

$$w_i(P) \stackrel{def}{=} \bigwedge_{(u \rightarrow v) \in P} w_i(u, v) \prec L_i \quad i = 1, \dots, \#QoS Metrics$$

→ Problèmes d'optimisation

$$Cost_k(P) \prec Cost_k(P') \quad k = 1, \dots, \#OptimizeCriteria$$

→ Problèmes de satisfaction de contraintes et d'optimisation



3. Routage à QoS dans les MANETs

Problèmes de routage à QoS à 1 métrique

$$Delay(P) \stackrel{def}{=} \sum_{(u \rightarrow v) \in P} Delay(u, v) \leq Dmax$$

$$BWD(P) \stackrel{def}{=} \min_{(u \rightarrow v) \in P} (bwd(u, v)) \geq Bmax$$

$$Dispo(P) \stackrel{def}{=} \prod_{(u \rightarrow v) \in P} (dispo(u, v)) \geq DispoMin$$

→ Problèmes résolus

→ Algorithmes de Dijkstra et Bellman-Ford



3. Routage à QoS dans les MANETs

Problèmes de routage à QoS à m métriques

$$Delay(P) \stackrel{def}{=} \sum_{(u \rightarrow v) \in P} Delay(u, v) \leq Dmax$$

$$\wedge \quad BWD(P) \stackrel{def}{=} \min_{(u \rightarrow v) \in P} (bwd(u, v)) \geq Bmax$$

$$\wedge \quad \#hops(P) \leq \#hops(P') \quad \forall P' \in SetFeasiblePaths$$

$\wedge \dots$

→ Problèmes NP-complets (généralement)

→ Recherche de fonctions de coûts, Heuristiques



3. Routage à QoS dans les MANETs

Principes de résolution (1/2)

→ Prise en compte contrainte par contrainte

- PS_1 = Sélection des chemins respectant QoS_1
- PS_2 = Sélection parmi l'ensemble PS_1 des chemins respectant QoS_2
-
- PS_m = Sélection parmi PS_{m-1} des chemins respectant QoS_m

→ Prise en compte d'une contrainte et optimisation de critère(s)

- Sélection de chemins respectant la contrainte QoS_x
- Optimisation d'un critère simple ou composé



3. Routage à QoS dans les MANETs

Principes de résolution (2/2)

→ Utilisation de métrique composée

$$\text{ComposedQoS}(P) = \left(1 - \frac{\text{Delay}(P)}{\text{DelayMax}}\right) * \left(1 - \frac{\text{Cost}(P)}{\text{CostMax}}\right)$$

$$\text{ComposedQoS}(P) = \frac{\text{Bwd}(P)}{\text{Delay}(P) * \text{Loss}(P)}$$

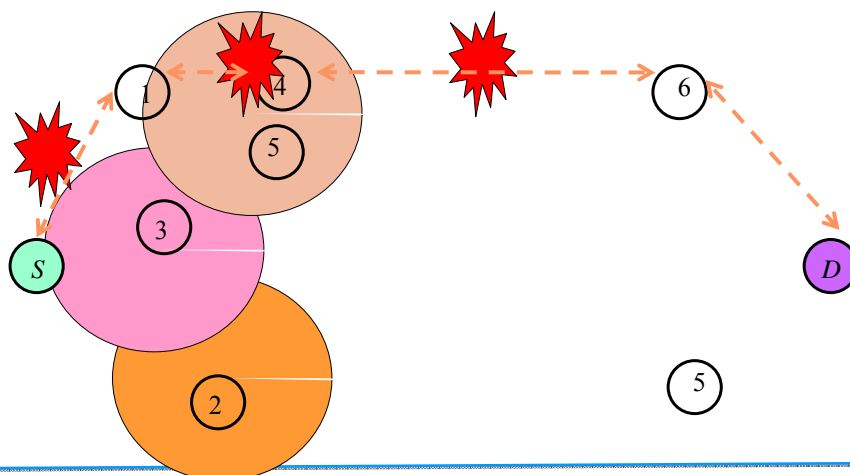
$$\text{ComposedQoS}(P) = \frac{\text{Delay}(P)}{1 - \frac{\text{Cost}(P)}{\text{CostMax}}}$$

→ Autres heuristiques



3. Routage à QoS dans les MANETs

Difficulté de fournir la QoS : un exemple simple



3. Routage à QoS dans les MANETs

Sources des difficultés à traiter le routage à QoS

- Absence d'infrastructure centralisée et de contrôle centralisé
⇒ Difficulté de coordonner les réservations
- Mobilité ⇒ Changements de la topologie ⇒ Remise en cause des réservations
- Capacités des liens fluctuantes
⇒ Difficulté/impossibilité de prédiction de la bande passante disponible
⇒ Dégradation de la qualité des applications audio/vidéo
⇒ Fourniture de QoS soft seulement
- Limitations de puissance
- Taux d'erreurs élevé sur les canaux radio
- Médium non sûr
-



3. Routage à QoS dans les MANETs

TBR (Ticket Based Routing)

- Idée de base : limiter les paquets de requête et ne les diriger que vers la destination en utilisant des tickets
- Chaque source possède un nombre de tickets de deux types (Jaune et Vert).
- Chaque paquet-requête contient un nombre de tickets. A chaque nœud traversé par la requête, une décision est prise sur le nombre de tickets à retirer du paquet (par exemple, un lien avec un délai faible retire plus de tickets jaunes qu'un lien avec un délai élevé)
- L'objectif du nombre de tickets jaunes est d'accroître la probabilité de trouver un chemin. Ainsi, un paquet-requête avec peu de tickets jaunes, signifie chercher un chemin avec un délai faible.
- L'objectif des tickets verts est de maximiser la probabilité de trouver un chemin avec un coût faible.
- Etat de lien maintenu = BP disponible et délai



3. Routage à QoS dans les MANETs

QoS-AODV (QoS-enabled Ad hoc On-demand Distance Vector) – Perkins (1/2)

- Extension des paquets **RouteRequest** et **RouteReply** et un paquet rajouté (**QoSLost**)
- **RouteRequest** étendu par :
 - Délai maximum (D_{max}) demandé pour transmettre de S à D
 - Minimum de bande passante (BP_{min}) demandée
- **Table de routage étendue par**
 - Liste des sources demandant des garanties de délai
 - Liste des sources demandant des garanties de BP



3. Routage à QoS dans les MANETs

QoS-AODV (QoS-enabled Ad hoc On-demand Distance Vector) (2/2)

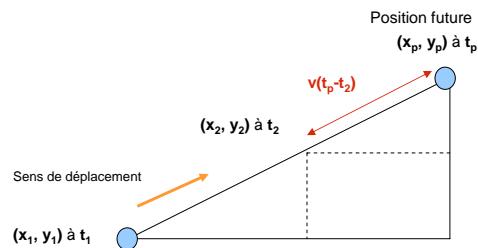
- **RouteReply** étendu par :
 - Délai maximum cumulé estimé par le nœud ayant relayé la réponse
 - Si délai cumulé est supérieur à D_{max} , la réponse est écartée
 - Minimum de bande observée entre le nœud qui relaye la requête et D
 - Si la BP estimée est inférieure à BP_{min} , la réponse est écartée
 - Liste des sources demandant des garanties de délai
 - Liste des sources demandant des garanties de BP
- Paquet **QoSLost**
 - Chaque nœud qui ne peut plus garantir la QoS envoie un paquet QoSLost aux sources concernées
- **Avantage** : simple extension de AODV
- **Inconvénient** : pas de réservation effective de ressources



3. Routage à QoS dans les MANETs

PLBQR (Predictive Location-based QoS Routing) (1/2)

- **Principe** : prédiction de la position future de la destination pour sélectionner les routes
- **Protocole de mise à jour** : chaque nœud diffuse périodiquement (ou en cas de changement important) sa position et l'état de ses ressources. Dans certains cas, il peut aussi diffuser sa vitesse et sa direction.
- **Prédiction de position** : Basée sur la similarité de triangles et théorème de Pythagore.



3. Routage à QoS dans les MANETs

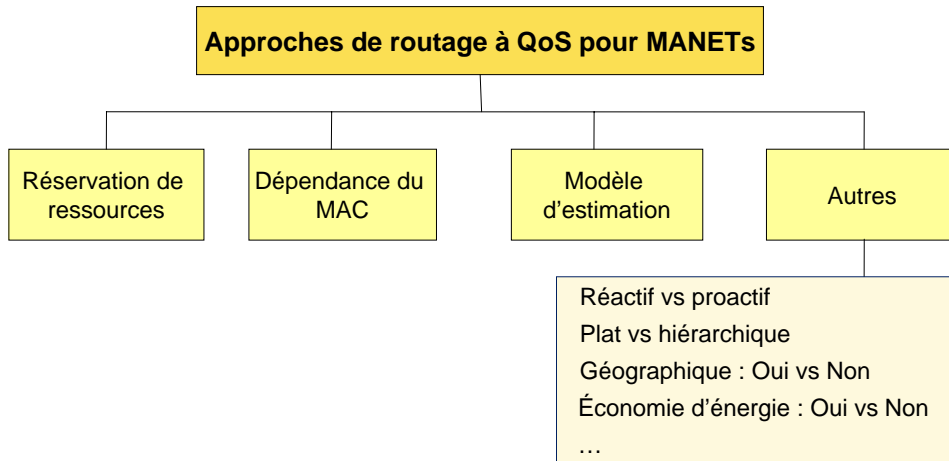
PLBQR (Predictive Location-based QoS Routing) (2/2)

- **Prédiction de délai** : PLBQR suppose que le délai e_{2e} de S à D est égal (estimé) au délai e_{2e} du dernier paquet de mise à jour émis par D et reçu par S . **Ce délai est donc variable selon la charge (pas de garantie de borne de délai).**
- **Routage à QoS**
 - Découverte de voisins à l'aide de la prédiction position-délai
 - Recherche des routes satisfaisant la QoS
 - Sélection de la route la plus courte géographiquement
 - La route est insérée dans les paquets de données



3. Routage à QoS dans les MANETs

Classification des approches (1/2)



3. Routage à QoS dans les MANETs

Classification des approches (2/2)

■ Réservation de ressources

Avec réservation

- par flux (IntServ) ou par marquage de paquet (DiffServ)
- Avec maintenance
 - * *soft* (MRSVP) et réparation de chemins (la plus répandue)
 - * *dure* (rare et peu adaptée aux MANETs)

Sans (approche *optimiste*)

■ MAC sous-jacent

CSMA/CA
TDMA
CDMA-over-TDMA
Quelconque

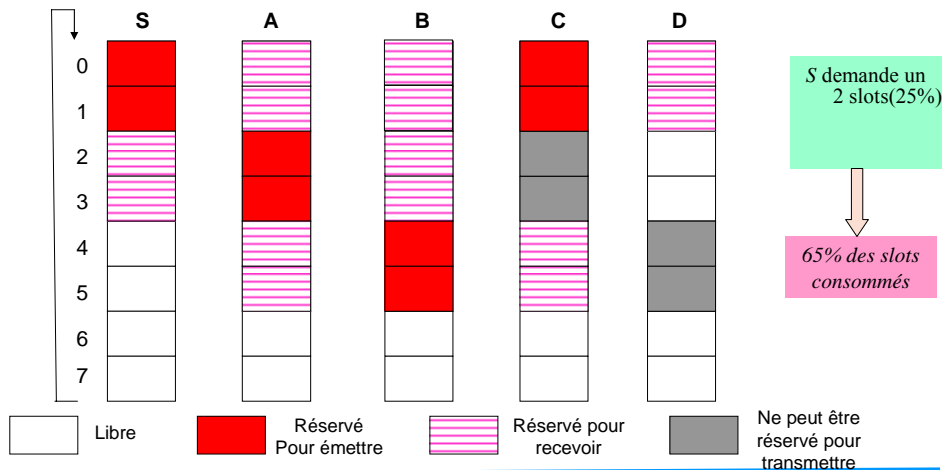
■ Modèle d'estimation du délai

Spécifique
Quelconque



3. Routage à QoS dans les MANETs

Exemple de réservation de slots synchrone avec TDMA



3. Routage à QoS dans les MANETs

RTMAC (Real-Time MAC) protocole – [Manoj 2002] (1/4)

- Objectif : support de trafic temps réel (type CBR) sur réseaux ad hoc
- RTMAC : un protocole MAC + un algorithme de routage
- Protocole MAC
 - Extension de 802.11 DCF (Distributed Coordination Function)
 - Deux parties : MAC pour le *Best effort*
un protocole de réservation pour flux temps réel
- Algorithme de routage = une extension de DSDV



3. Routage à QoS dans les MANETs

RTMAC (Real-Time MAC) protocole (2/4)

■ Procédure de réservation

- Quatre nouveaux paquets **prioritaires** (*ResvRTS*, *ResvCTS*, *ResvACK*, *ResvNCTS*) sont utilisés pour réserver
- Division du temps en super trames
- Chaque super trame contient un certain nombre de slots à réserver (*resv-slots*)
- Durée d'un *resv-slot* = 2 fois le délai maximum de propagation
- Chaque flux réserve un certain nombre de *resv-slots* consécutifs dans chaque super trame sur chaque lien du chemin de la source à la destination
- Chaque nœud maintient une table de réservation indiquant pour chaque paire <source, destination> : les *resv-slots* et les instants de début et fin de réservation



3. Routage à QoS dans les MANETs

RTMAC (Real-Time MAC) protocole (3/4)

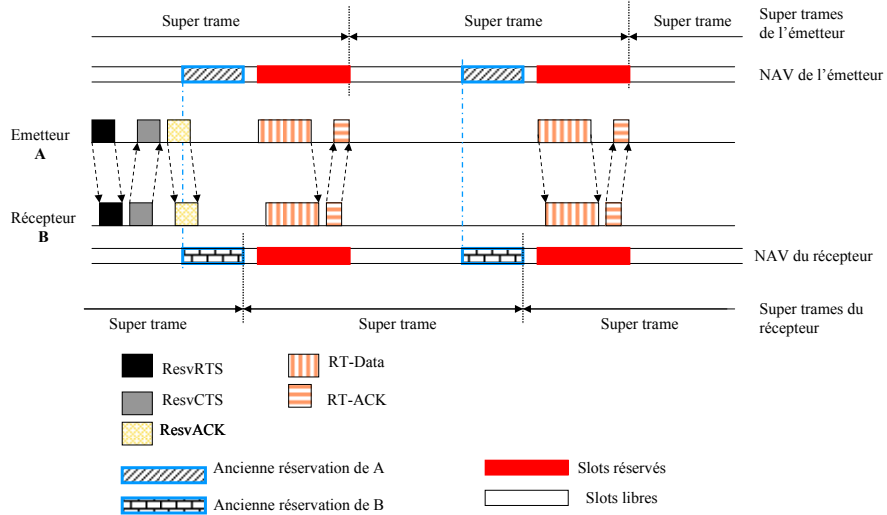
■ Procédure de réservation (suite)

- Soit **A** le nœud qui veut réserver **Y** slots auprès du nœud **B**.
Il envoie un *ResvRTS* contenant **Y** et un temps relatif (**offset**) qui indique le début de la réservation par rapport à l'instant absolu d'envoi du *ResvRTS*.
- En recevant le *ResvRTS*, le nœud **B** teste si les slots demandés sont libres.
- Si les slots sont libres, le nœud **B** met à jour sa table de réservation et envoie un *ResvCTS* contenant les mêmes informations que le *ResvRTS*. Ensuite :
 - * **Les nœuds voisins de B** mettent à jour leur table de réservation tenant compte des informations du *ResvCTS*.
 - * **Le nœud A** envoie un *ResvACK* contenant les mêmes informations de réservation pour permettre à ses voisins de mettre à jour leur table.
- Si les slots demandés ne sont pas libres, un *ResvNCTS* (négatif) est renvoyé obligeant **A** à modifier ses paramètres et tenter la réservation plus tard.
- Si le *ResvRTS* est reçu par **B** durant un slot déjà réservé, il l'ignore. S'il répond par un *ResvNCTS*, il peut causer des collisions avec des réservations des voisins.



3. Routage à QoS dans les MANETs

Exemple de réservation avec RTMAC (4/4)



3. Routage à QoS dans les MANETs

Méthodes d'estimation de bande passante

Méthode de Cansever et al 1999

■ Principe

$$BPDispo_i = BpNonUtilisee_i - \sum_{j \in N_i} \sum_{k \in N_j} BP(flux_{j \rightarrow k})$$

$$BpNonUtilisee_i = CapacitéCanal_i - \sum_{j \in N_i} BP(flux_{i \rightarrow j})$$

N_x : voisins de x

- **Difficulté d'utilisation** : estimation de la bande passante consommée par les flux du nœud i et de ses voisins



3. Routage à QoS dans les MANETs

Méthodes d'estimation de bande passante

Méthode de Kazantzidis et Gerla 2002

- Méthode utilisable avec IEEE 802.11 en mode DCF

- Principe

$$BPDispo_{i \rightarrow j} = (1 - u) * Rendement_{i \rightarrow j}$$

$$Rendement_{i \rightarrow j} = Moyenne(RendementPaquet_k, k = 1, \dots, 32)$$

$$RendementPaquet = \frac{TaillePaquet}{t_queue + (t_trans + t_CE + t_OH) * R + \sum_{r=1}^R t_b_r}$$

$$u = 1 - \frac{TempsLibre}{DureeFenetreMesure}$$

- Difficulté d'utilisation : estimation de temps intermédiaires t_queue, \dots et du nombre de retransmissions R



3. Routage à QoS dans les MANETs

Méthodes d'estimation de délai

Principe répandu

- Estimation de délai moyen par EWMA (Exponentially Weighted Moving Average)

$$D_{moy}^j = (1 - \alpha) D_{reel}^j + \alpha * D_{moy}^{j-1}$$

$$D_{moy}^j = \alpha * D_{moy}^j + (1 - \alpha) * \beta * |D_{reel}^j - D_{moy}^j|$$

- Difficulté d'utilisation : valeurs des poids α et β .



4. Conclusion

- Routage = fonction clé pour l'utilisation des MANETs
- Beaucoup de protocoles de routage existent
- Après l'euphorie ! tendance vers : MANETs spécialisés, RCSF, Réseaux Mesh
- **Challenges**
 - Approches statistiques pour l'estimation des métriques
 - Fonctions Poids génériques et configurables
 - Ingénierie de trafic pour les réseaux ad hoc
 - Méthodes de réservation de ressources
 - Méthodes de gestion de clash de réservation de ressources
 - Contrôle d'admission et adaptabilité des applications
 - Messagerie d'urgence dans les MANETs



5. Conclusion

- Autoconfiguration
 - ➔ Unification des approches, modélisation des fonctions de routage
 - ➔ Choix guidé de protocole de routage (en fonction des flux, densité du réseau, mouvements des nœuds)
 - ➔ Combinaison efficace des protocoles (routage sensible à la charge)
 - ➔ Maîtrise de l'imprécision de l'information d'état de lien pour anticiper
 - ➔ Meilleure exploitation des infos de localisation (3D, obstacles...), modèles de déplacement, modèles de réservation de ressources
- Routage dans des MANETs hétérogènes

