

Satellites d'observation et réseaux de capteurs autonomes au service de l'environnement

Patrice Raveneau¹

¹IRIT – Université de Toulouse – INPT

Soutenance de thèse de doctorat :
Vendredi 20 Juin 2014



Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre
- 6 Conclusion



- Partenariat CNES ;
- Plusieurs types de missions d'observation ;
- Plusieurs technologies d'observation.

Observation de l'environnement

| But | Période | Couverture | Mobilité | Lien montant | Lien descendant | Exemples |
|------------------------------------|---------|------------|----------|--------------|----------------------------------|---|
| Diminuer Temps Réponse Secours | min. | locale | moyenne | permanence | si crise détectée | SAFER GARNET-E GEO Pictures G-MOSAIC |
| Surveillance Activités illégales | min. | locale | grande | permanence | à la demande | G-MOSAIC |
| Surveillance Champ de bataille | min. | locale | moyenne | à la demande | à la demande | SYSTEM-F6 |
| Télé médecine | min. | régionale | grande | à la demande | à la demande | TéléSanté |
| Surveillance Tremblements de Terre | min. | mondiale | nulle | permanence | jamais | DEMETER |
| Surveillance Maritime | heure | régionale | nulle | permanence | changement conditions navigation | LIMES EAMNet JASON EELIAD |
| Suivi Populations | jour | locale | moyenne | permanence | jamais | EELIAD |
| Surveillance Environnement | jour | mondiale | nulle | permanence | jamais | CARBONES EURO4 |
| Exploration Extra-terrestre | mois | locale | faible | occasionnel | à la demande | MARS-EXPRESS |



Plan

- 1 **Contexte**
 - Missions
 - **Technologies**
 - Motivations
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre
- 6 Conclusion



- Réseaux de capteurs sans fil ;
- Satellites d'observation ;
- Drones ;
- Ballons ;
- ...



Réseaux de capteurs sans fil

- Petits équipements, pas chers ;
- Réseaux auto-configurables ;
- Protocoles minimisant l'énergie (IEEE 802.15.4) ;
- Évolution d'une vision applications vers une vision réseau (6LoWPAN).



Satellites d'observation

- Satellites à orbite basse (LEO) ;
- Faibles contraintes de délai ;
- Protocoles adaptés au satellite ;
- Évolution vers des systèmes multi-missions et interopérables (EO-1, CLEO sur UK-DMC)



Plan

- 1 **Contexte**
 - Missions
 - Technologies
 - **Motivations**
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre
- 6 Conclusion



- Différentes technologies mais missions communes ;
- Spécificités au niveau de la couche liaison ;
- Limitations de la mémoire (missions secondaires, contraintes matérielles) ;
- Intermittence des liens.

Objectifs

- Proposer une architecture unifiée.
- Solutions spécifiques et généricité.



Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude**
 - Description
 - Contraintes
 - Les réseaux tolérants au délai
 - Solutions
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre

Surveillance d'une forêt

- Couvrir la majorité des contraintes ;
- Suivi d'espèces ;
- Prévention et Suivi de crises.

| | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Source du trafic | Périodique |
| Nombre de trafics | Plusieurs (différentes priorités) |
| Durée de vie | un jour / une semaine |
| Types de capteurs au sol | Statiques et mobiles |
| Volume des données | 10 octets (sol) / 100Mo (sat) |

Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude**
 - Description
 - Contraintes**
 - Les réseaux tolérants au délai
 - Solutions
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre

Scénario

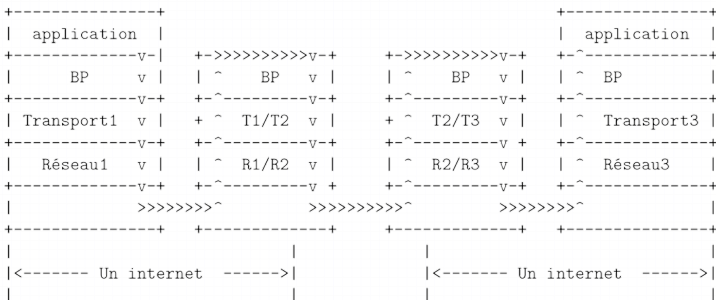
Contraintes et conséquences

| Contraintes | Conséquences |
|----------------------|---|
| Satellites LEO | Interruptions sur les liens |
| Possibilité de crise | Diminution de la connexité, Hausse du trafic |
| Connexité partielle | Stockage à bord des satellites |
| Nœuds mobiles | Contacts sporadiques, Radio allumée en permanence |

Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude**
 - Description
 - Contraintes
 - Les réseaux tolérants au délai**
 - Solutions
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre

- Réseau interplanétaire ;
- Réseau d'overlay ;



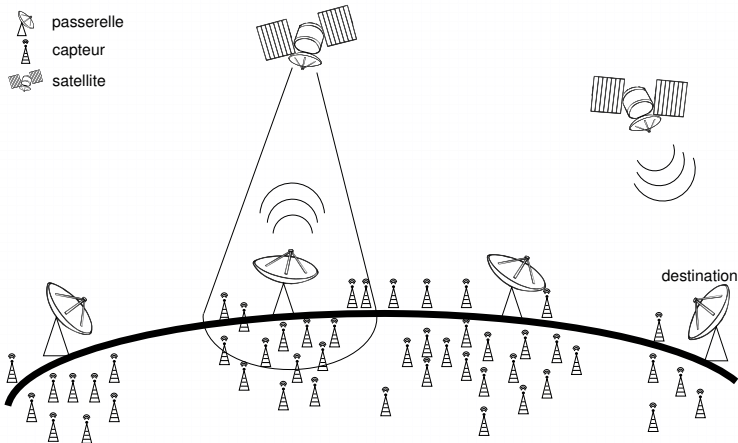
- Tolérance aux interruptions.



Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude**
 - Description
 - Contraintes
 - Les réseaux tolérants au délai
 - Solutions**
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre

Topologie retenue

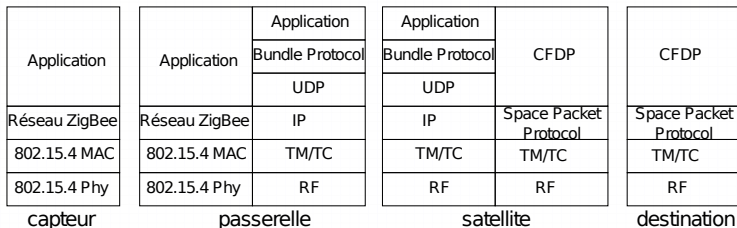


Plan

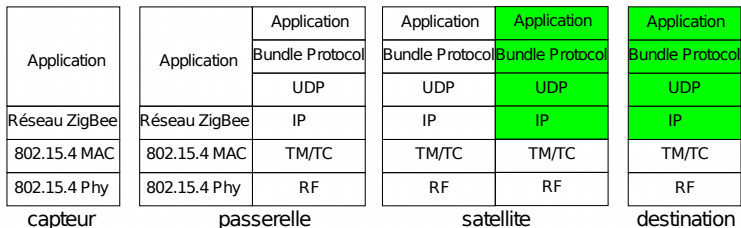
- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures**
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre
- 6 Conclusion



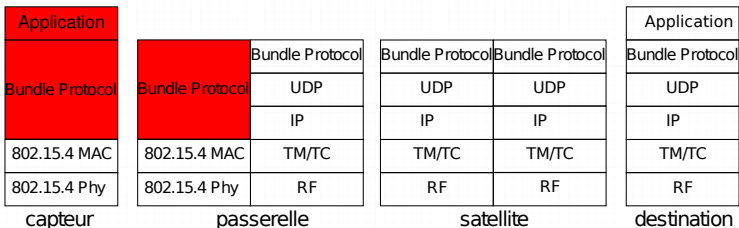
Architecture la moins envahissante



Architecture intégrant le satellite



Architecture la plus globale



Comparaison des différentes architectures

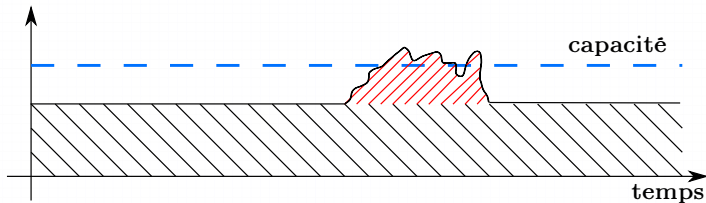
| Archi | Avantages | Inconvénients |
|-------|--|---------------------------------------|
| 1 | Interruptions prises en charge | Pas de retour de destination |
| 1 | Peu d'impacts sur l'architecture classique | Satellite passerelle applicative |
| 2 | Réseau satellite DTN | Plus de fonctionnalités sur satellite |
| 2 | Passerelles joignables | Pas de capteurs mobiles |
| 3 | Réseau DTN | Overhead sur satellite |
| 3 | Tout équipement joignable | Limite mémoire sur capteurs |

Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite**
 - Contraintes avec satellite
 - Carreau et les priorités
 - Martinet et équité
- 5 Segment terrestre
- 6 Conclusion



- Hausse du trafic sporadique ;
trafic cumulé



- Connexité intermittente.

Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite**
 - Contraintes avec satellite
 - Carreau et les priorités**
 - Martinet et équité
- 5 Segment terrestre
- 6 Conclusion



Transmission Totale(TT)

Passerelle transmet quand un satellite est présent :

Chargement Total (CT)

Les passerelles arrêtent de transmettre quand la mémoire du satellite est saturée :

Carreau : décision de transmission



-
- 1: **Pour chaque** contact avec une passerelle **Faire**
 - 2: **Pour chaque** réception de Bundle **Faire**
 - 3: **Si** mémoire Libre $>$ taille d'un Bundle **Alors**
 - 4: stocker Bundle # *stockage du Bundle par ordre décroissant de*
 - 5: *priorité puis par ordre croissant d'échéance*
 - 6: **Sinon**
 - 7: Transmettre à la passerelle le Bundle en fin de file # *ce Bundle*
a la priorité la plus faible et l'échéance la plus grande
 - 8: **Fin Si**
 - 9: **Fin Pour**
 - 10: **Fin Pour**
-

Notations

- N , nombre de Bundles que la mule peut transporter.
- m , nombre de stations terrestres.
- T , durée d'un cycle de la mule.
- $A_{i,j}$, nombre d'arrivées de la classe de trafic i à la station j pour un cycle donné.
- θ_i , durée de vie de chaque Bundle de la classe de trafic i .
- C , nombre total de cycles où une crise est présente.

Le nombre de pertes pour un cycle est n_{TT} :

$$n_{TT} = \max \left(0, \left(\sum_i \sum_{j=1}^m (A_{i,j}) - N \right) \right)$$

Le nombre de Bundles perdus pendant la crise est n_{CT} :

$$n_{CT} = \sum_i \sum_{j=j_p}^m \sum_{r=1}^C \left[n_{i,j}(r) \times \min \left(1, \sum_{l=r}^C \left\lfloor \frac{\theta_i}{l \cdot T} \right\rfloor \right) \right]$$

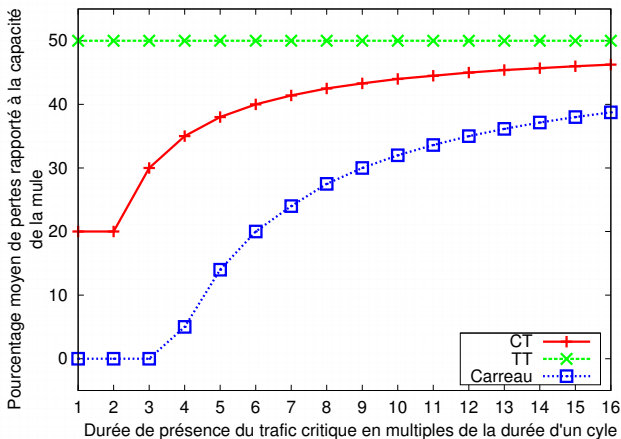
n_{car} est le nombre de Bundles perdus pendant la crise :

$$n_{car} = \sum_i \sum_j \sum_{r=1}^C \left[n_{parq_{i,j}}(r) \times \min \left(1, \sum_{l=r}^C \left\lfloor \frac{\theta_i}{l \cdot T} \right\rfloor \right) \right]$$

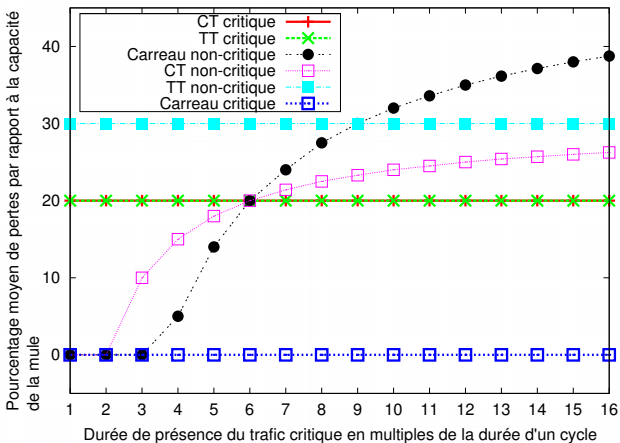
Résultats analytiques

- 2 trafics ;
- non-prioritaire : 90% ;
- prioritaire : 60% ;

Pourcentage de pertes



Pourcentage de pertes



Le routage

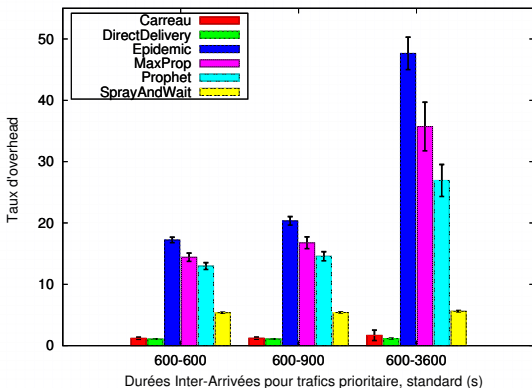
- Prédicible :
 - Contact Graph Routing (CGR).
- Non-déterministe :
 - Réplication :
 - Epidemic ;
 - PRoPHET ;
 - MaxProp ;
 - Quota :
 - SprayAndWait.

Simulations

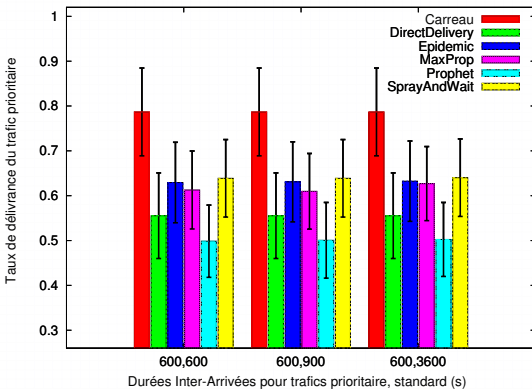
The One

| | |
|--|------------------|
| Nombre de satellites | 5 |
| Mémoire des satellites | 50 Mo |
| Mémoire des passerelles | 500 Mo |
| Nombre de passerelles | 5 |
| Durée des simulations | 5 jours |
| Taille des Bundles | 1Mo |
| Période inter-arrivée trafic permanent (s) | [600, 900, 3600] |
| Période inter-arrivée trafic critique (s) | 600 |
| Durée de vie des données critiques | 30 h |

Overhead



Taux de délivrance du trafic prioritaire



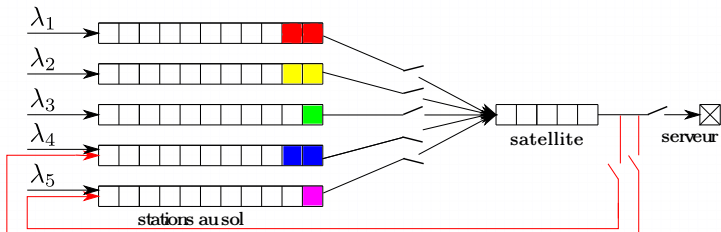
Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite**
 - Contraintes avec satellite
 - Carreau et les priorités
 - Martinet et équité**
- 5 Segment terrestre
- 6 Conclusion

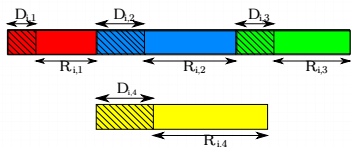


Équité à priorité égale

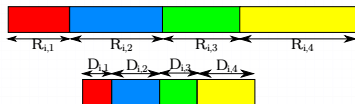
Garantir équité entre stations pendant une crise :



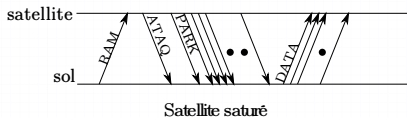
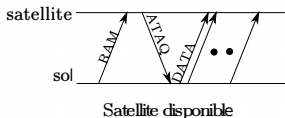
Définition de l'équité : proportion égale d'occupation de la mémoire du satellite



Avant i



Après i



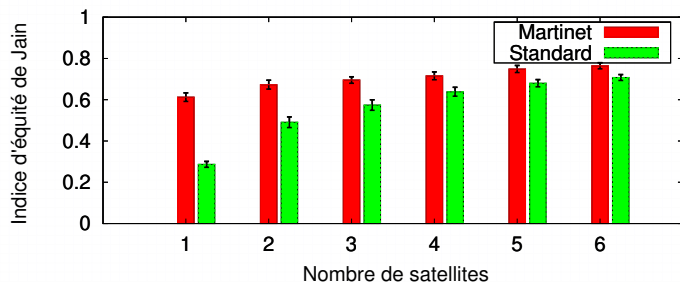
EthiKable : Équité pour chaque passerelle

-
- 1: **Pour chaque** Requête de transmission d'un volume de Bundles d'une passerelle *j* **Faire**
 - 2: **Si** la somme des trafics présents sur le satellite est inférieure à sa capacité **Alors**
 - 3: Accepter la transmission
 - 4: **Sinon**
 - 5: **Répéter**
 - 6: **Pour** chaque trafic datant d'une époque donnée **Faire**
 - 7: **Pour** chaque trafic provenant d'une passerelle **Faire**
 - 8: Déposer une proportion équitable de Bundles
 - 9: **Fin Pour**
 - 10: Accepter une proportion équitable de Bundles au sol
 - 11: Équité atteinte pour trafic créé à une époque donnée
 - 12: **Fin Pour**
 - 13: **Jusqu'à** Équité atteinte pour le trafic le plus récent à bord
 - 14: **Fin Si**
 - 15: **Fin Pour**
-

Implantation de Martinet et tests avec linux containers :

| | Standard | Martinet |
|---|-----------------|-----------------|
| Taux de délivrance | 0.75 | 0.75 |
| Répartition des taux de délivrance par source | 0.66 / 0.33 | 0.55 / 0.44 |

Simulations avec The One : Standard = DirectDelivery



Conclusion

- Surcharges sporadiques ;
- Faible connexité ;
- Carreau utilise la mémoire disponible au sol ;
- Martinet fournit l'équité entre les stations au sol.

Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre**
 - **Contraintes des capteurs**
 - Étude des accusés de réception
 - FREAK : Choix des relais fondé sur l'historique
- 6 Conclusion



Implantation du Bundle Protocol sur capteurs

TABLE : Comparaison des différentes implantations pour déploiement sur MicaZ

| Implantation | Langage adapté | Mémoire pré-allouée | Taille du code | Bundle Protocol interopérable | Couche de convergence basse |
|--------------|----------------|---------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| ION | ✓ | ✓ | X | ✓ | X |
| DTN2 | X | X | X | ✓ | X |
| IBR-DTN | ✓ | ✓ | X | ✓ | X |
| μ DTN | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ |
| DTNLite | ✓ | ✓ | ✓ | X | ✓ |
| ContikiDTN | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |

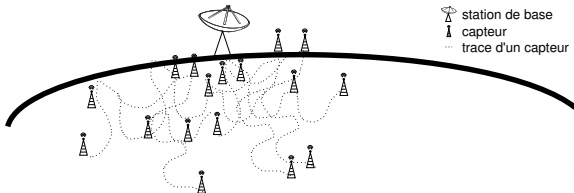
nanoDTN

- Inspirée de μ DTN ;
- Plus légère ;
- Architecture modulable (adaptée à la mission) ;
- Preuve de concept : test avec un émetteur périodique et un récepteur à portée ;
- Orientation de la réflexion :
 - mécanismes simples ;
 - peu de ressources mémoire.



Scénario

- Nœuds mobiles ;
- Station de collecte statique ;
- Mostly-on ;
- Limitations mémoire ;
- Limitations de capacité de traitement.



Plan

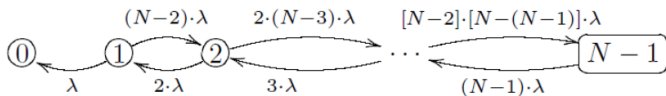
- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre**
 - Contraintes des capteurs
 - Étude des accusés de réception**
 - FREAK : Choix des relais fondé sur l'historique
- 6 Conclusion



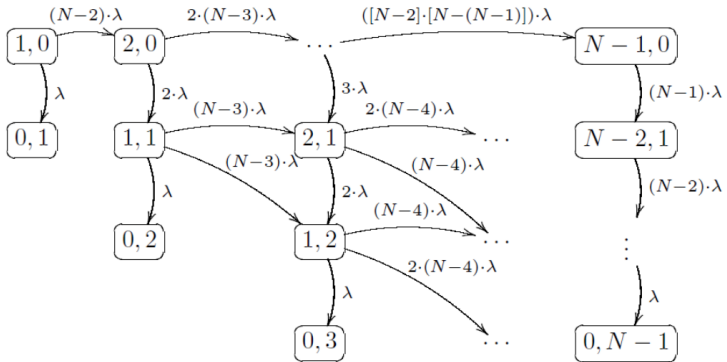
- Intuition : Accusés de réception (ACK) consomment de la mémoire
- ACK \Rightarrow Gain ou perte ?
- Modèles analytiques avec et sans ACK pour étudier le temps de séjour en mémoire infinie.

Nombre de copies dans le réseau sans ACK

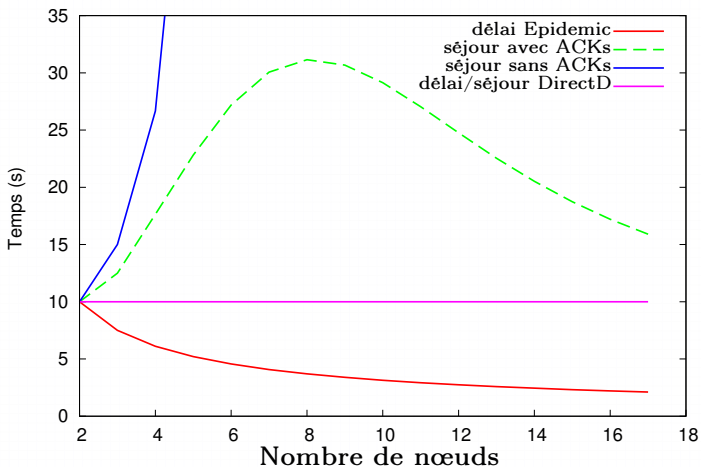
- Epidemic ;
- Durée inter-contacts exponentielle.



Nombre de copies dans le réseau avec ACK



Délais et temps de séjour avec et sans ACKS



Plan

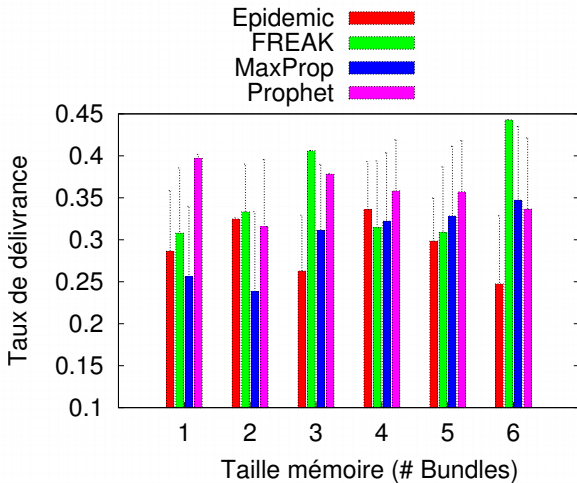
- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 **Segment terrestre**
 - Contraintes des capteurs
 - Étude des accusés de réception
 - **FREAK : Choix des relais fondé sur l'historique**
- 6 Conclusion

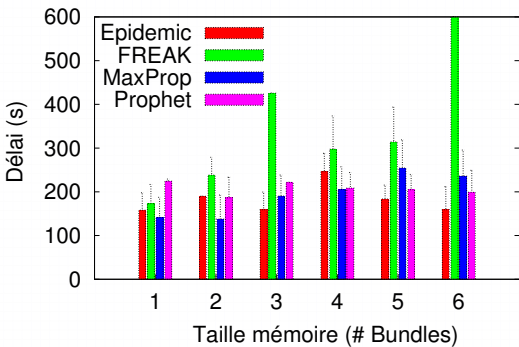
Frequency Routing Encounter And Keenness : FREAK

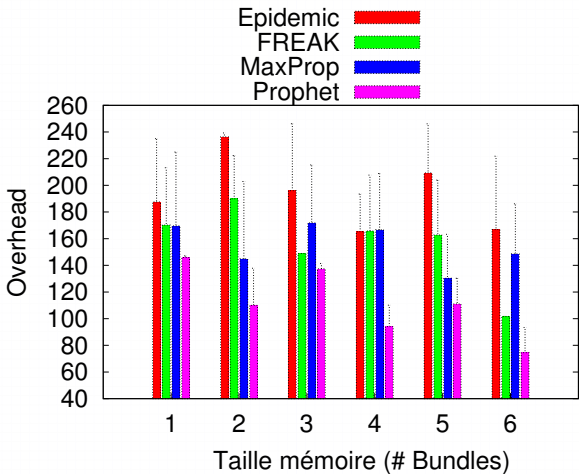
- Les nœuds n'ont pas une mobilité erratique.
- Certains nœuds plus fréquemment proches de la destination.
- Idée : relayer les messages vers ces nœuds.
- FREAK mesure la fréquence de contacts avec la station de base.
- Les meilleurs relais sont ceux avec la fréquence la plus élevée.



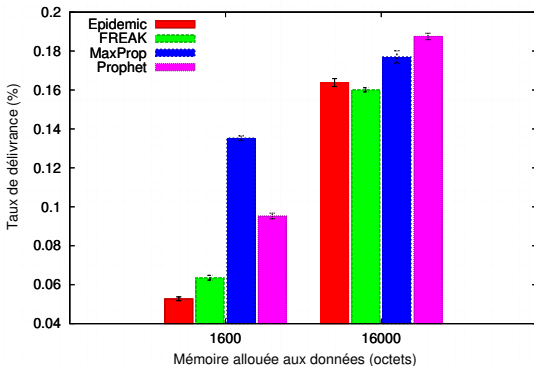
-
- 1: Soit A le nœud local
 - 2: $nbrContacts = 0$
 - 3: $freq = 0$
 - 4: **Pour chaque** nœud rencontré (nommé B) **Faire**
 - 5: **Si** B est la destination **Alors**
 - 6: $nbrContacts ++$ # Si c'est la destination on met à jour la métrique
 - 7: $freq = \frac{nbrContacts}{CurrentTime}$
 - 8: Envoyer tous les Bundles # et on lui transmet tous les Bundles
 - 9: Supprimer les Bundles délivrés
 - 10: **Sinon**
 - 11: **Si** $contact_{freq}(A) < contact_{freq}(B)$ **Alors** # Si le nœud rencontré voit la destination plus souvent
 - 12: envoyer Bundles à B # alors on lui transmet tous les Bundles
 - 13: **Sinon**
 - 14: attendre les Bundles de B # sinon on attend les siens
 - 15: **Fin Si**
 - 16: **Fin Si**
 - 17: **Fin Pour**
-



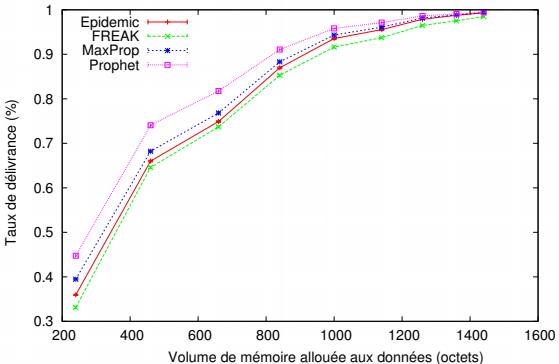




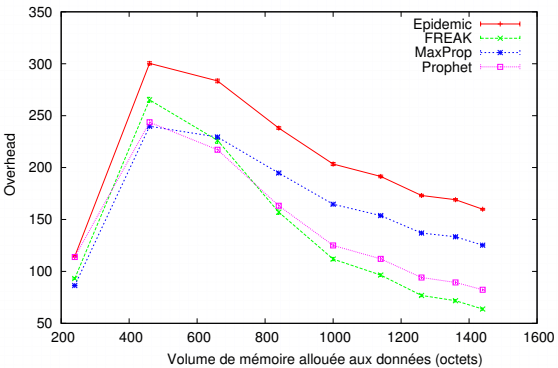
Taux de délivrance sans ACK



Taux de délivrance avec variation de la mémoire allouée aux ACK



Overhead avec variation de la mémoire allouée aux ACK



Conclusion

- Utiliser les rencontres passées pour améliorer les transmissions futures ;
- FREAK : léger et implantable sur capteurs ;
- ACK améliorent nettement les performances.

Plan

- 1 Contexte
- 2 Scénario d'étude
- 3 Architectures
- 4 Segment satellite
- 5 Segment terrestre
- 6 **Conclusion**
 - Conclusion
 - Perspectives

- Architectures répondant aux contraintes de multi-missions ;
- Propositions sur le segment satellite ;
- Capteurs mobiles et utilité des ACK ;
- Implantation de DTN sur capteurs.

- Hétérogénéité des technologies ;
- Suppression de messages plus anciens qu'une durée fonction de la durée moyenne de délivrance ;
- Décision de transmissions sur un groupe de nœuds à portée ;
- Applicable à des projets comme SWIPE.

?

Questions ?

