# Primitives de communication pour les réseaux dynamiques

## Diffusion globale et diffusion convergente

Aymeric Agon-Rambosson

LIP6, Sorbonne Université - CNRS

16 septembre 2025

Thèse soutenue devant un jury composé de :

| | |
|---|---|
| **M. Stefano Secci**, Professeur des universités, CEDRIC, CNAM | *Rapporteur* |
| **M. Guillaume Pierre**, Professeur des universités, IRISA, Université de Rennes | *Rapporteur* |
| **Mme Fabienne Boyer**, Professeur des universités, LIG, UGA | *Examinatrice* |
| **M. Jonathan Lejeune**, Maître de conférences, LIP6, Sorbonne Université | *Encadrant* |
| **M. Julien Sopena**, Maître de conférences, LIP6, Sorbonne Université | *Encadrant* |
| **M. Pierre Sens**, Professeur des universités, LIP6, Sorbonne Université | *Directeur de thèse* |

# Introduction

**Fog computing**, évolution décentralisée du *cloud* :

- Dynamicité
- Communications sans fil

Applications distribuées reposent sur des mécanismes comme le consensus, l'élection de coordinateur, le verrou distribué dont les performances dépendent des **primitives de communication**.

# Introduction

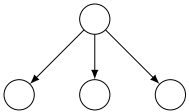
**Fog computing**, évolution décentralisée du *cloud* :

- Dynamicité
- Communications sans fil

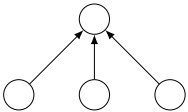
Applications distribuées reposent sur des mécanismes comme le consensus, l'élection de coordinateur, le verrou distribué dont les performances dépendent des **primitives de communication**.

Les mécanismes de communications sont très coûteux dans les **réseaux dynamiques** :

**Contribution 1** : diffusion globale (*broadcast*)
Mieux répartir la charge des retransmissions



**Contribution 2** : diffusion convergente (*convergecast*)
Éviter les collisions causées par les réponses synchronisées

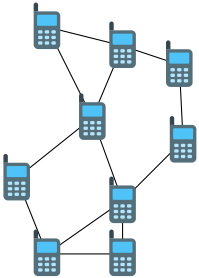


# Modèle

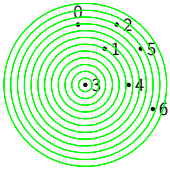
# Modèle du réseau dynamique

**Réseau mobile** :

- Sans infrastructure préexistante : retransmission de paquets pour d'autres nœuds
- Mobilité des nœuds, alimentation sur batterie
- Communication sans fil (WiFi), collisions
- Aucun nœud ne dispose d'information globale
- Identifiant unique par nœud

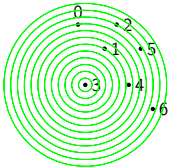


# Modèle de communication

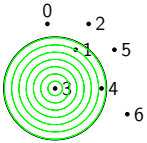



Comportement réel du signal

# Modèle de communication

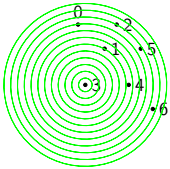



Comportement réel du signal

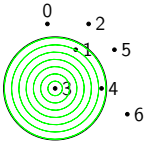



Portée du radiotransmetteur

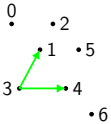
# Modèle de communication




Comportement réel du signal

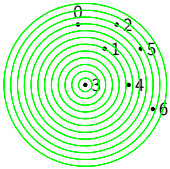



Portée du radiotransmetteur

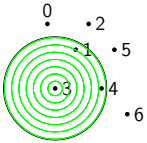



Représentation d'un envoi de message omnidirectionnel

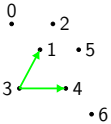
# Modèle de communication



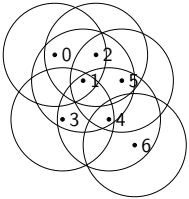

Comportement réel du signal




Portée du radiotransmetteur

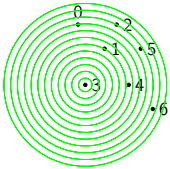



Représentation d'un envoi de message omnidirectionnel

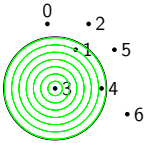



Portée identique des radiotransmetteurs

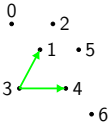
# Modèle de communication



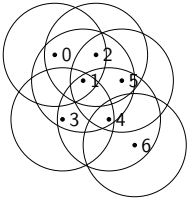

Comportement réel du signal



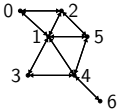

Portée du radiotransmetteur




Représentation d'un envoi de message omnidirectionnel

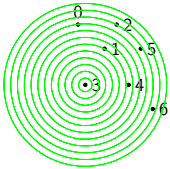



Portée identique des radiotransmetteurs

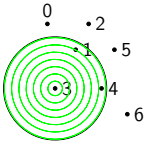



Représentation graphe orienté

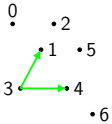
# Modèle de communication



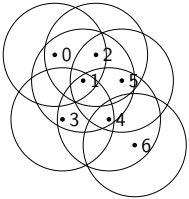

Comportement réel du signal



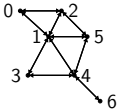

Portée du radiotransmetteur



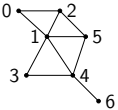

Représentation d'un envoi de message omnidirectionnel




Portée identique des radiotransmetteurs



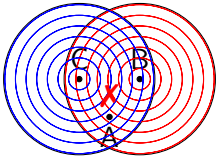

Représentation graphe orienté




Représentation simplifiée : graphe non orienté

# Collisions et esquive des collisions

**Collision des signaux** lorsque les émetteurs sont à portée l'un de l'autre

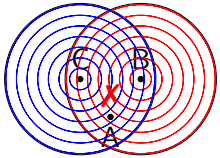



Solution, **CSMA/CA** :

- **Écoute** de la porteuse avant émission
- Retardement aléatoire
- Mécanisme d'acquittement **facultatif**

# Collisions et esquive des collisions

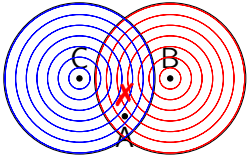
**Collision des signaux** lorsque les émetteurs sont à portée l'un de l'autre




Solution, **CSMA/CA** :

- **Écoute** de la porteuse avant émission
- Retardement aléatoire
- Mécanisme d'acquittement **facultatif**

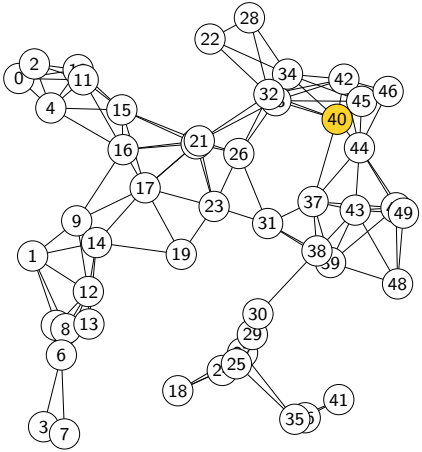
**Terminal caché** lorsque les émetteurs sont hors de portée l'un de l'autre



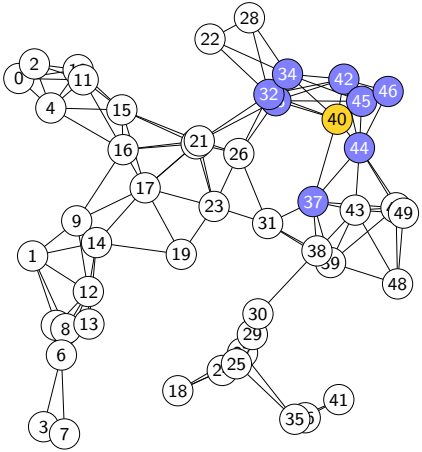

**CSMA/CA défaillant** :

- Nécessité d'une solution de niveau réseau

# Voisinages

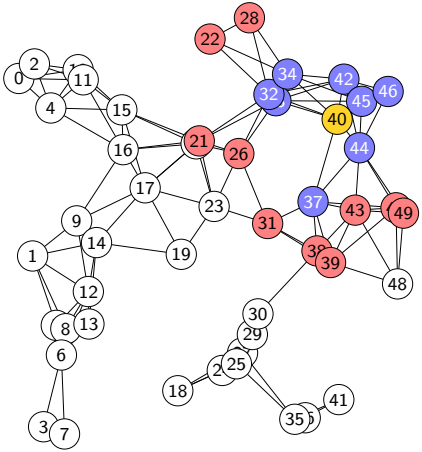

28
22
2
0
11
34
42
46
32
45
4
15
40
16
21
26
44
17
23
37
43
49
9
31
14
1
19
38
39
48
12
30
8
13
29
6
25
18
41
35
3
7

# Voisinages




1-voisinage **strict** de 40

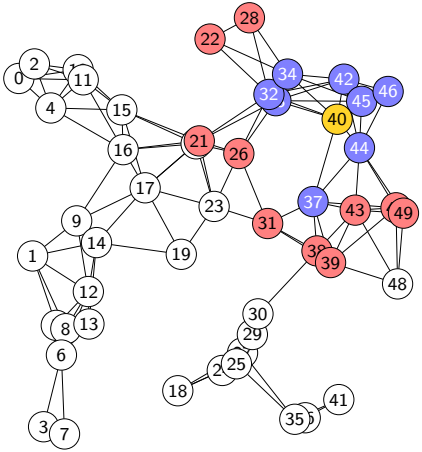
# Voisinages




1-voisinage **strict** de 40

2-voisinage **strict** de 40

# Voisinages

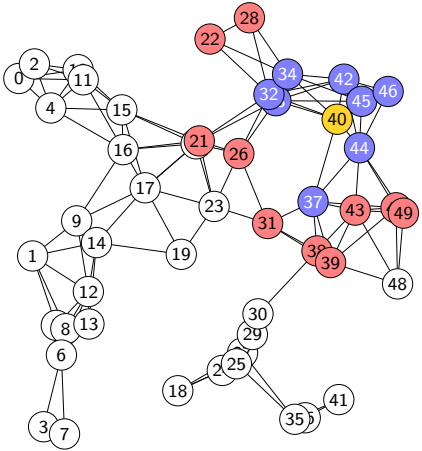



1-voisinage **strict** de 40

2-voisinage **strict** de 40

1-voisinage (**large**) de 40 :
40 + 1-voisinage **strict**

# Voisinages



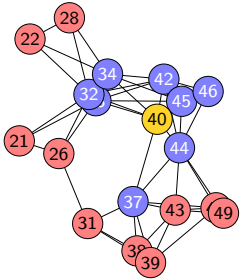

1-voisinage **strict** de 40

2-voisinage **strict** de 40

1-voisinage (**large**) de 40 :
40 + 1-voisinage **strict**

2-voisinage (**large**) de 40 :
40 + 1-voisinage **strict** + 2-voisinage **strict**

# Voisinages




1-voisinage **strict** de 40

2-voisinage **strict** de 40

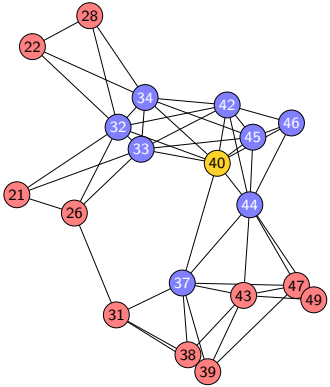
1-voisinage (**large**) de 40 :
40 + 1-voisinage **strict**

2-voisinage (**large**) de 40 :
40 + 1-voisinage **strict** + 2-voisinage **strict**

Sous-graphe induit par le 2-voisinage

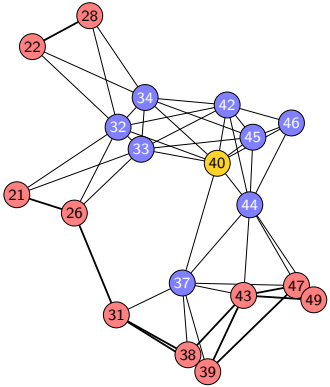
# Informations sur le voisinage

Information *complète* sur le 2-voisinage :
Connaissance du sous-graphe induit par le 2-voisinage large (nœuds et arêtes)

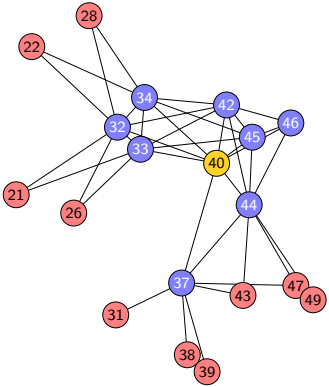


# Informations sur le voisinage

Information *complète* sur le 2-voisinage :
Connaissance du sous-graphe induit par le 2-voisinage large (nœuds et arêtes)




Information *partielle* sur le 2-voisinage :
Information *complète*, moins les arêtes reliant deux éléments du 2-voisinage **strict**



# Contribution 1 (diffusion globale) : MPR alternant

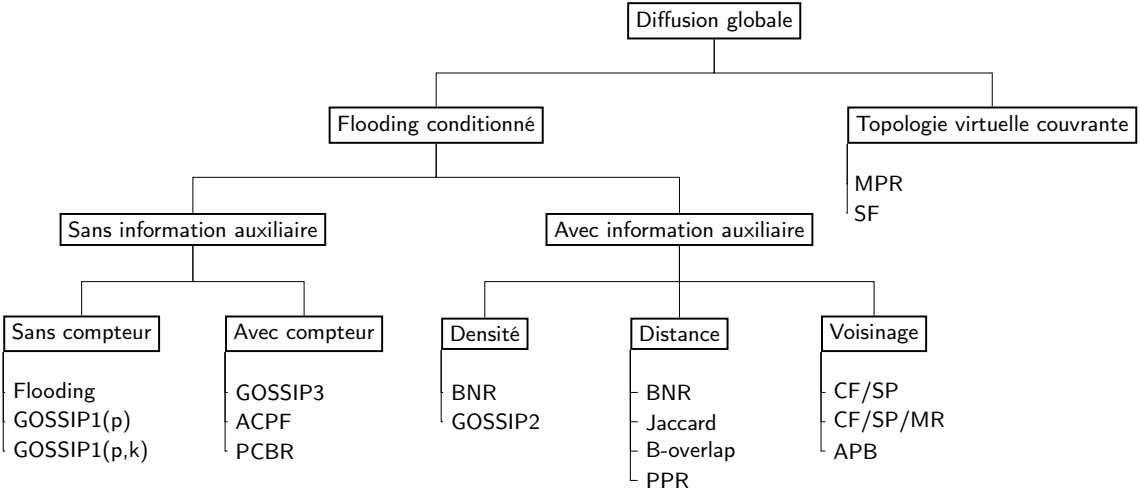
# Diffusion globale dans les réseaux dynamiques

**Objectif** :
Envoyer un message depuis un nœud vers tous les autres nœuds du graphe.

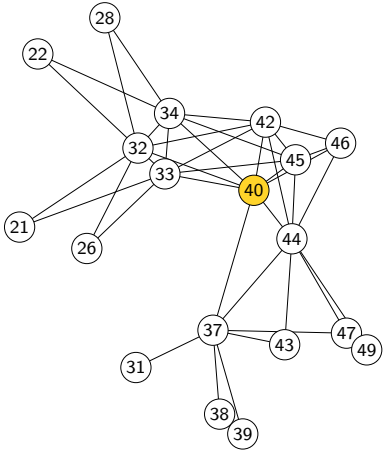
**Contraintes** :

- Pas de garantie de livraison possible (diffusion *au mieux*)
- Chaque message doit être délivré au plus une fois

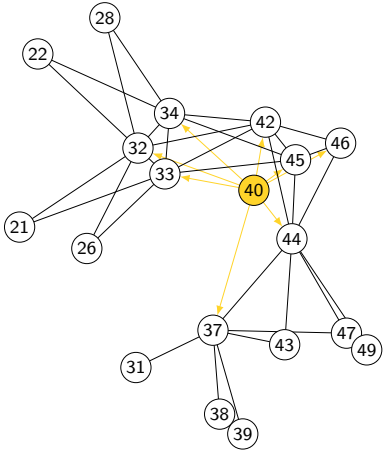
# État de l'art diffusion globale



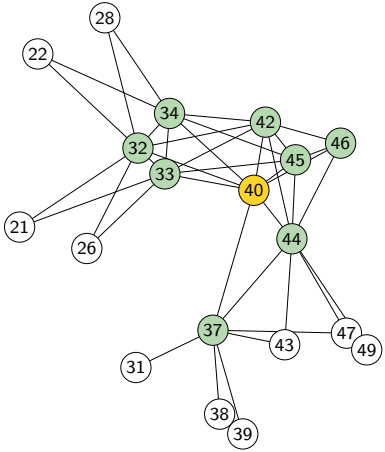
# Flooding, exemple



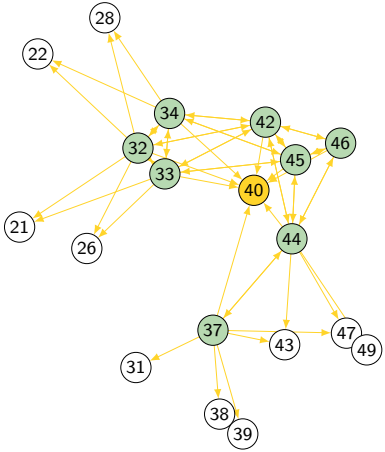
# Flooding, exemple



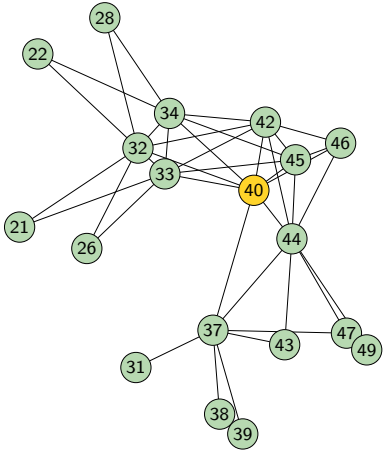
# Flooding, exemple



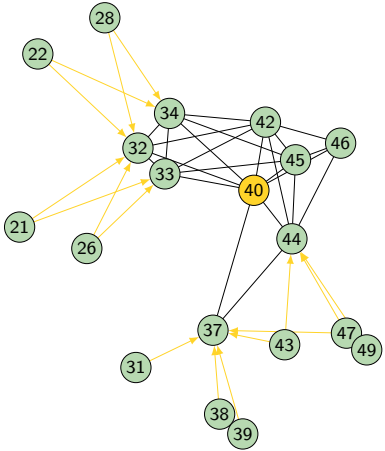
# Flooding, exemple



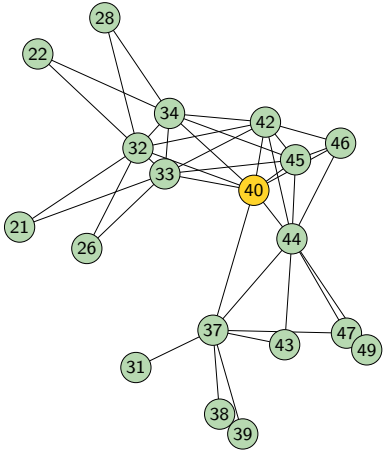
# Flooding, exemple



# Flooding, exemple



# Flooding, exemple




**Avantages** :

- Aucune information nécessaire
- Algorithme très simple

**Inconvénients** :

- Retransmissions redondantes
- Collisions (*tempête de diffusion*)

# MPR (MultiPoint Relais)

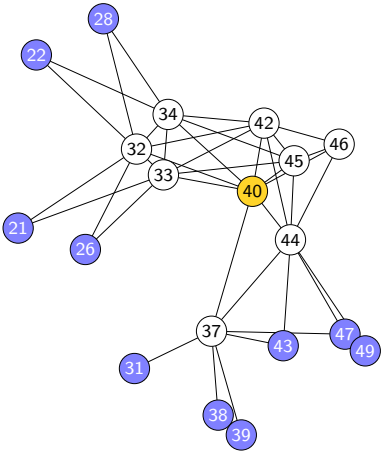
**Intuition** :
Calculer, parmi les 1-voisins, l'ensemble de relais minimum suffisant pour la couverture du 2-voisinage.

**Problème** :
Calcul du CDS minimum, problème NP-complet.

## Heuristique de sélection des relais (Viennot 1998)

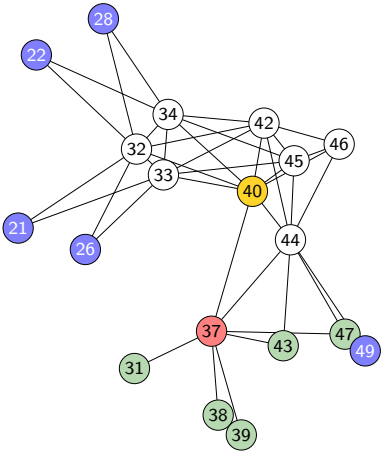
- Inclure les relais **nécessaires**
- Tant que la couverture est incomplète, ajouter le relais de couverture supplémentaire maximale
- Arrêt quand la couverture est complète

# MPR, exemple




Il faut couvrir le 2-voisinage

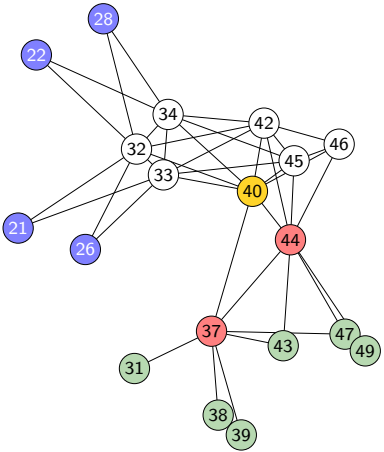
# MPR, exemple




Il faut couvrir le 2-voisinage

- 31 isolé :
  - Inclusion de 37
  - {31,38,39,43,47} couvert

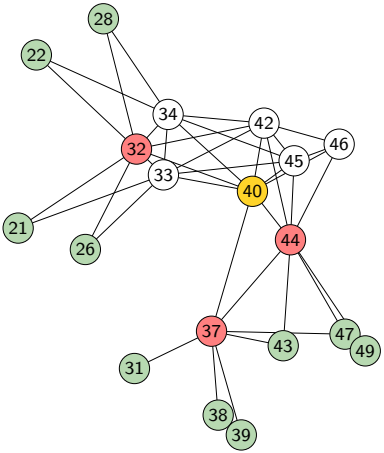
# MPR, exemple




Il faut couvrir le 2-voisinage

- 31 isolé :
  - Inclusion de 37
  - {31,38,39,43,47} couvert
- 49 isolé :
  - Inclusion de 44
  - {49} couvert

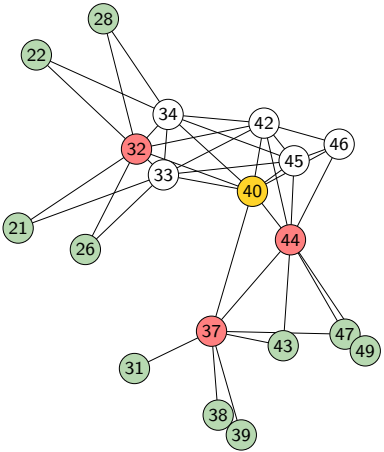
# MPR, exemple




Il faut couvrir le 2-voisinage

- 31 isolé :
  - Inclusion de 37
  - {31,38,39,43,47} couvert
- 49 isolé :
  - Inclusion de 44
  - {49} couvert
- 32 degré maximal (4) dans {21,22,26,28} :
  - Inclusion de 32
  - {21,22,26,28} couvert

# MPR, exemple

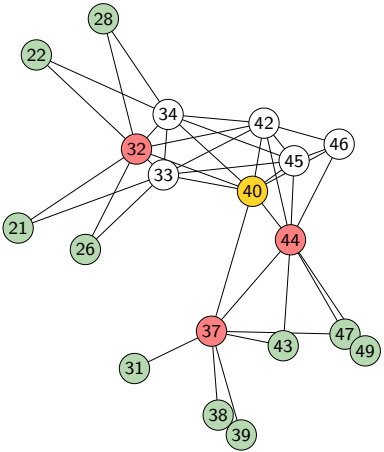



Il faut couvrir le 2-voisinage

- 31 isolé :
  - Inclusion de 37
  - {31,38,39,43,47} couvert
- 49 isolé :
  - Inclusion de 44
  - {49} couvert
- 32 degré maximal (4) dans {21,22,26,28} :
  - Inclusion de 32
  - {21,22,26,28} couvert

$\mathrm{MPR}_{40} = \{37,44,32\}$

# MPR, exemple



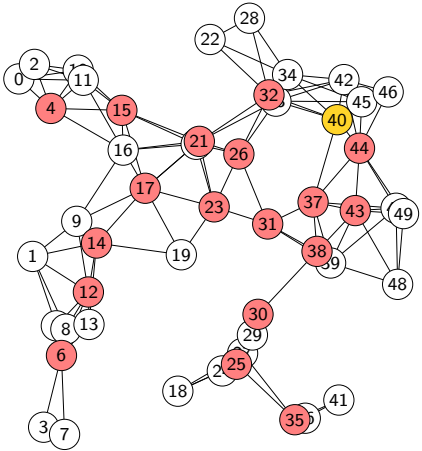

**Avantages** :

- Beaucoup moins de retransmissions

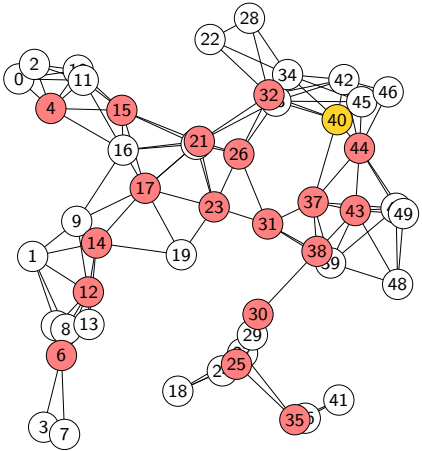
**Inconvénients** :

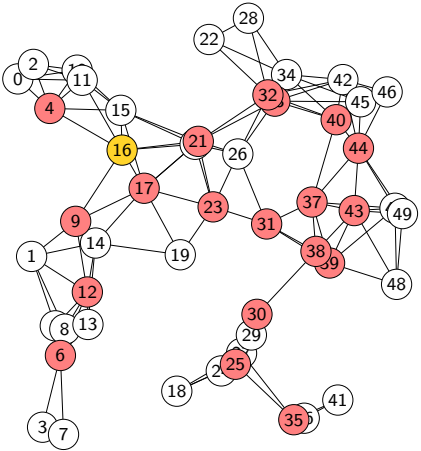
- Nécessite *l'information partielle* sur le 2-voisinage
- Déterministe : 32 retransmet toujours, 33 et 34 ne retransmettent jamais.

# Staticité des ensembles MPR

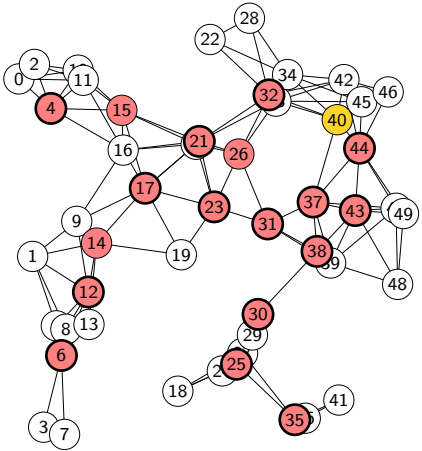


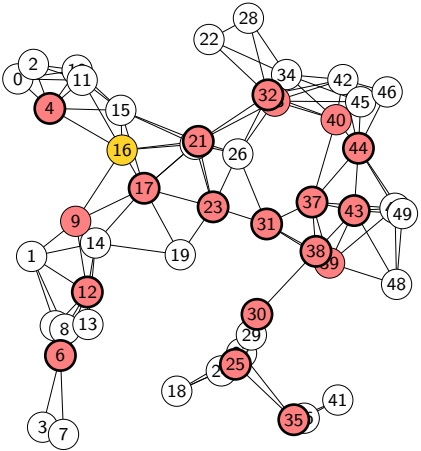
# Staticité des ensembles MPR



# Staticité des ensembles MPR




$$|\,\mathrm{MPR}_{40} \cap \mathrm{MPR}_{16}\,| = 17 \text{ (70\% de l'union)}$$

# Évaluation de la similarité des ensembles MPR

## Indice de Jaccard

$$J(A,B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

## Indice de Jaccard généralisé *robuste*

$$J(G) = J(MPR_0, \ldots, MPR_{N-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N-1} \frac{|MPR_i \cap MPR_j|}{|MPR_i \cup MPR_j|}}{\binom{N}{2}}$$

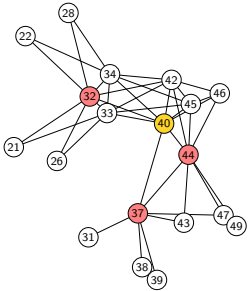
| $N$ | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
|---|---|---|---|---|---|
| Degré moyen | 5,16 | 10,46 | 15,69 | 20,93 | 26,16 |
| Moyenne $J(G)$ | 0,802 | 0,559 | 0,423 | 0,352 | 0,305 |

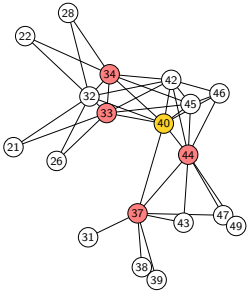
Coefficient de Jaccard *robuste* sur échantillon de graphes géométriques aléatoires de différentes tailles.

# MPR alternant

**Problème** :
MPR sollicite toujours les mêmes nœuds, causant une consommation énergétique accrue et leur disparition prématurée.

**Intuition** :
Proposer plusieurs ensembles de relais dont l'intersection est limitée aux seuls relais nécessaires.



# MPR alternant

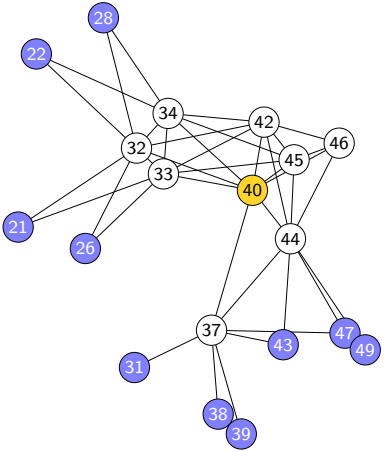
**Problème** :
MPR sollicite toujours les mêmes nœuds, causant une consommation énergétique accrue et leur disparition prématurée.

**Intuition** :
Proposer plusieurs ensembles de relais dont l'intersection est limitée aux seuls relais nécessaires.

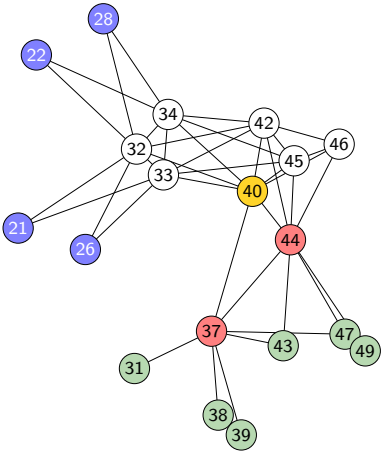
## Heuristique de sélection des relais, MPR alternant

- Ajouter les relais nécessaires
- Tant que la couverture est incomplète, ajouter le relais **autorisé** de couverture supplémentaire maximale, et le sortir de l'ensemble des relais autorisés.
- Arrêt quand la couverture est complète (succès) ou quand plus aucun relais autorisé ne couvre de nouveaux nœuds (échec).
- Répétition pour un nouvel ensemble jusqu'à rencontrer un échec.

# MPR alternant, exemple

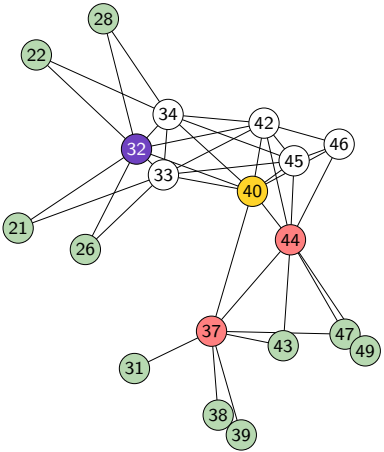


# MPR alternant, exemple



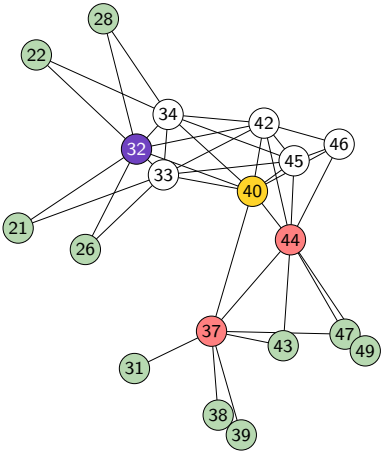

- 31 isolé :
  - Inclusion de 37
  - {31,38,39,43,47} couvert
- 49 isolé :
  - Inclusion de 44
  - {49} couvert

# MPR alternant, exemple




- 31 isolé :
  - Inclusion de 37
  - {31,38,39,43,47} couvert
- 49 isolé :
  - Inclusion de 44
  - {49} couvert
- 32 degré maximal (4) dans {21,22,26,28} :
  - Inclusion de 32
  - {21,22,26,28} couvert

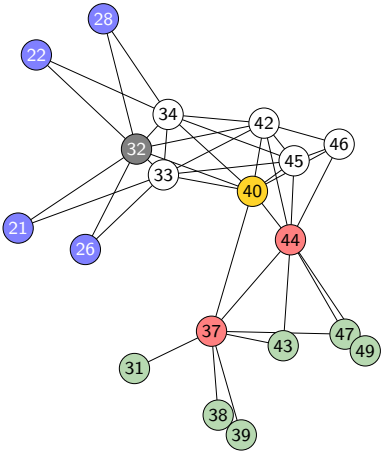
# MPR alternant, exemple




- 31 isolé :
  - Inclusion de 37
  - {31,38,39,43,47} couvert
- 49 isolé :
  - Inclusion de 44
  - {49} couvert
- 32 degré maximal (4) dans {21,22,26,28} :
  - Inclusion de 32
  - {21,22,26,28} couvert

$\mathrm{MPR}_{40}(1)$ : {37, 44, 32}

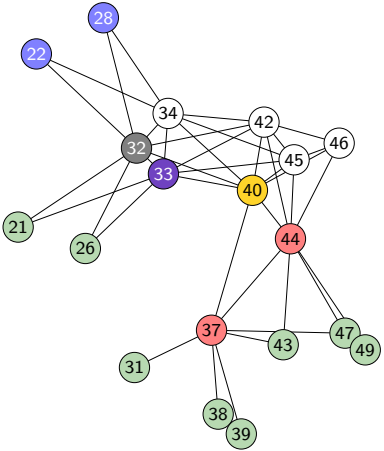
# MPR alternant, exemple




$\mathrm{MPR}_{40}(1)$ : {37, 44, 32}

{32} interdit

# MPR alternant, exemple

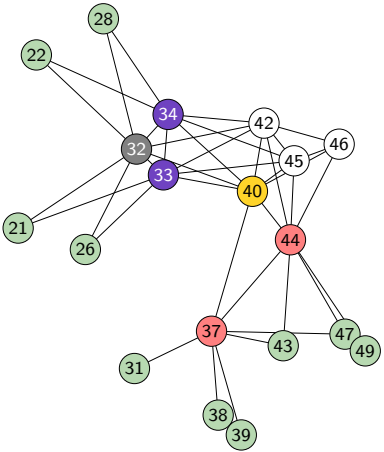



$\mathrm{MPR}_{40}(1)$ : {37, 44, 32}

{32} interdit

- 33 degré maximal (2) dans {21,22,26,28} :
  - Inclusion de 33
  - {21,26} couverts

# MPR alternant, exemple

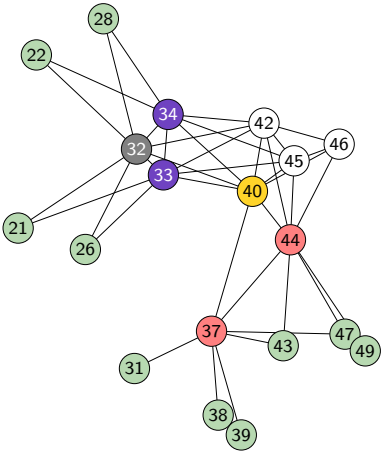



$MPR_{40}(1)$ : {37, 44, 32}

{32} interdit

- 33 degré maximal (2) dans {21,22,26,28} :
  - Inclusion de 33
  - {21,26} couverts
- 34 degré maximal (2) dans {22,28} :
  - Inclusion de 34
  - {22,28} couverts

# MPR alternant, exemple



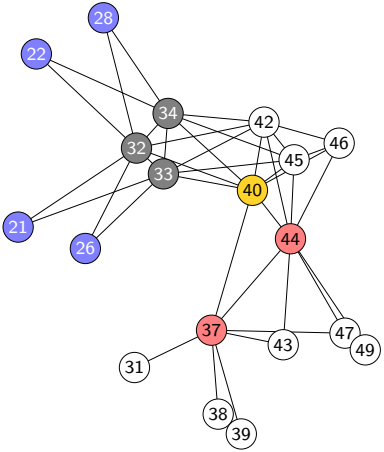

$MPR_{40}(1)$ : {37, 44, 32}

{32} interdit

- 33 degré maximal (2) dans {21,22,26,28} :
  - Inclusion de 33
  - {21,26} couverts
- 34 degré maximal (2) dans {22,28} :
  - Inclusion de 34
  - {22,28} couverts

$MPR_{40}(2)$ : {37, 44, 33, 34}

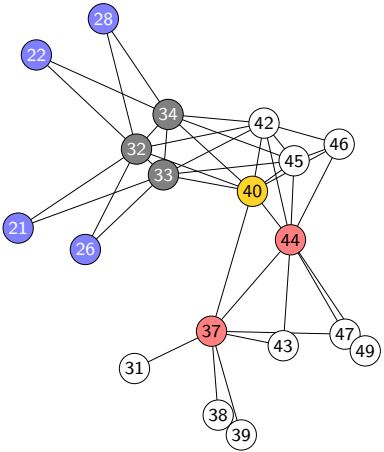
# MPR alternant, exemple




$\mathrm{MPR}_{40}(1)$ : $\{37, 44, 32\}$
$\mathrm{MPR}_{40}(2)$ : $\{37, 44, 33, 34\}$

$\{32, 33, 34\}$ interdit

# MPR alternant, exemple

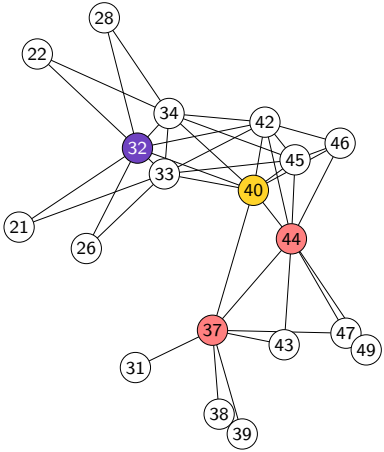



$MPR_{40}(1)$ : {37, 44, 32}
$MPR_{40}(2)$ : {37, 44, 33, 34}

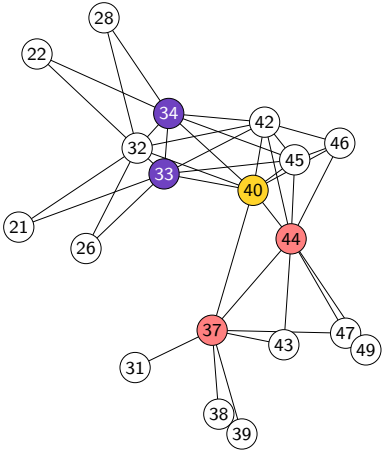
{32, 33, 34} interdit

- Aucun nœud avec degré > 0 dans {21,22,26,28} :
  - Échec, sortie

# MPR alternant, exemple




$MPR_{40}(1)$ : {37, 44, 32}




$MPR_{40}(2)$ : {37, 44, 33, 34}

# Simulation

**OMNeT++/INET**, simulateur à événements discrets qui modélise :

- Radiotransmetteur WiFi
- CSMA/CA
- Collisions

**Algorithmes comparés** :

- Flooding
- MPR statique
- MPR alternant

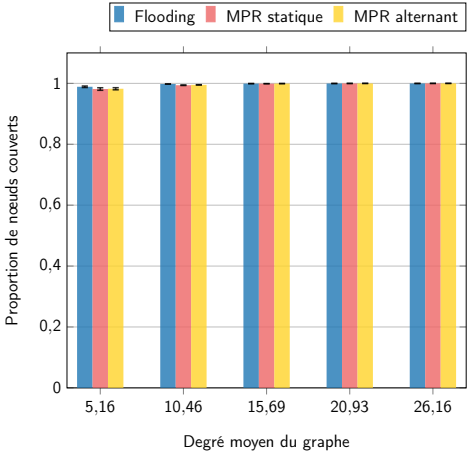
**Métriques** :

- Taux de couverture (proportion des nœuds ayant reçu le message)
- Moyenne des retransmissions par nœud
- Variance des retransmissions par nœud

**Méthodologie** :

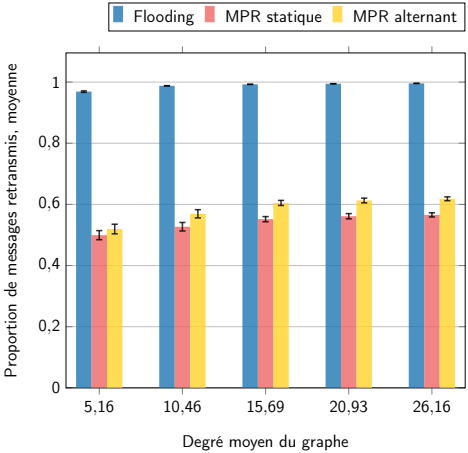
- Échantillon de $5 \times 100$ *graphes géométriques aléatoires*, avec $N = \{50,100,150,200,250\}, R = 0{,}2$

# Taux de couverture



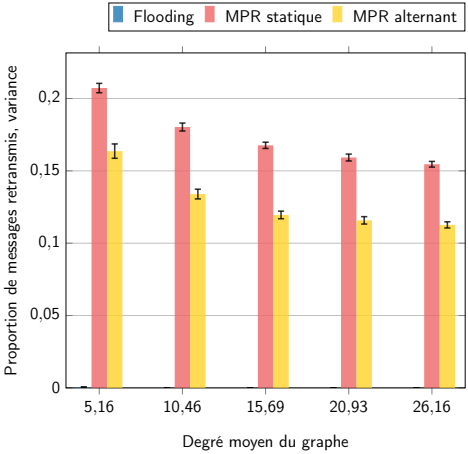

Pas de dégradation du taux de couverture

# Moyenne des retransmissions




MPR statique retransmet moins, et le coût de MPR alternant est minime

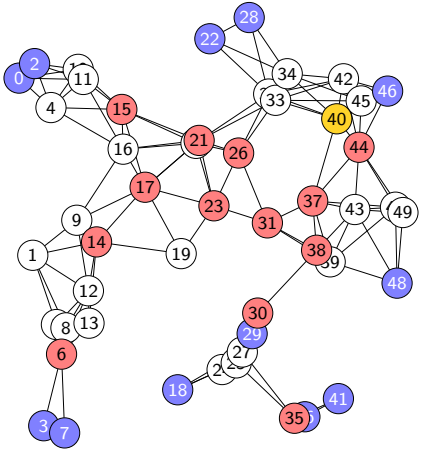
# Variance des retransmissions




MPR alternant répartit mieux la charge que MPR statique

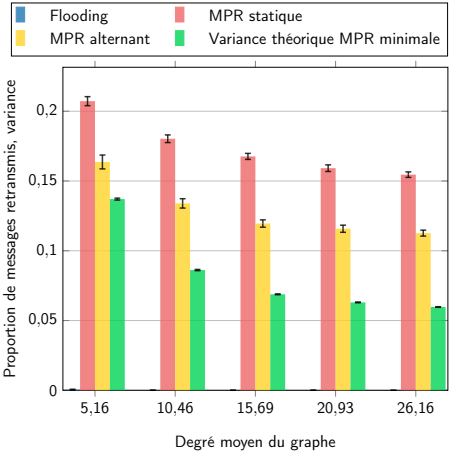
# Variance théorique minimale

$$\mathbb{V} = \frac{\sum_{x_i \in N}(x_i - \bar{x})^2}{n} + \frac{\sum_{x_i \in B}(x_i - \bar{x})^2}{n} + \frac{\sum_{x_i \in \overline{N} \cap \overline{B}}(x_i - \bar{x})^2}{n}$$




Relais nécessaires et nœuds de bordure

# Variance des retransmissions




MPR alternant réalise entre 40 et 60% de la diminution maximale possible de la variance

# MPR alternant, conclusion

**Mise en évidence des limites de MPR statique** :

- Mauvaise répartition de la charge énergétique des retransmissions

**Contribution 1, MPR alternant**, nouvel algorithme de diffusion globale :

- Heuristique de construction d'ensembles de relais *presque disjoints*

**Résultats de simulation** :

- Retransmissions mieux réparties (environ 50% de la diminution de variance possible)
- Pas de dégradation du taux de couverture
- Pas d'augmentation du temps de diffusion
- Coût minimal en retransmissions (+5% par rapport à MPR statique)

# Contribution 2 (diffusion convergente) : Convergecast distribué

# Diffusion convergente, spécification

Les applications distribuées reposent sur :

- Phase de requête $\longrightarrow$ diffusion globale
- Phase de réponse $\longrightarrow$ diffusion convergente

## Diffusion convergente

Diffusion d'un message :

- De tous les nœuds du réseau vers le même nœud
- De manière synchronisée
- Immédiatement après une diffusion globale

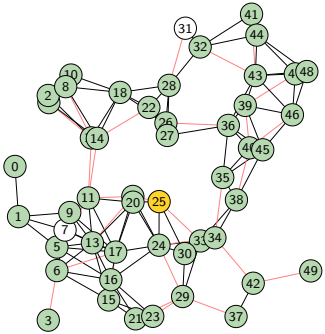
Peut être implémentée avec N diffusions point-à-point, mais :

**synchronisation $\longrightarrow$ collisions**

# Diffusion convergente via unicast : collisions

**Expérience** :

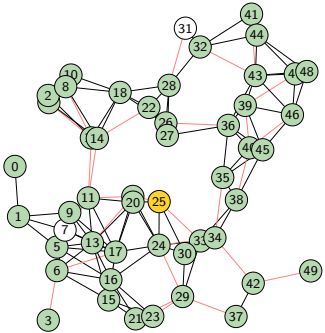
- Requête : diffusion globale depuis 25
- Réponse : N diffusions point-à-point (OLSR, Optimised Link State Routing) vers 25

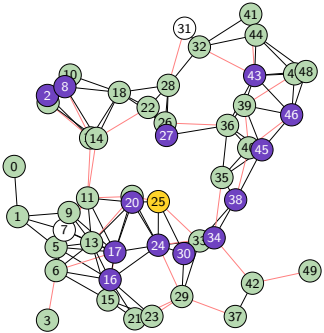


# Diffusion convergente via unicast : collisions

**Expérience** :

- Requête : diffusion globale depuis 25
- Réponse : N diffusions point-à-point (OLSR, Optimised Link State Routing) vers 25

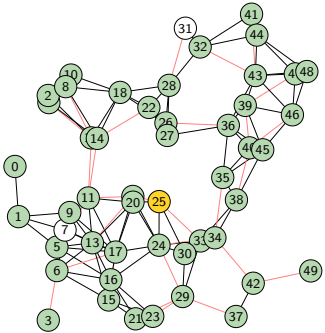


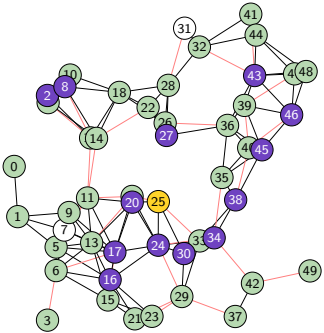


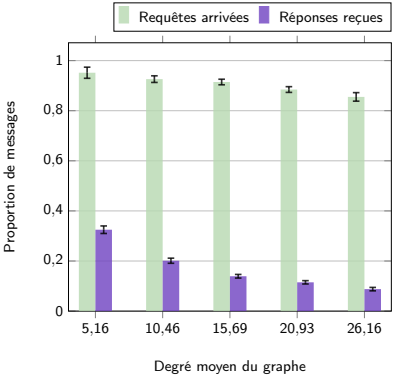
# Diffusion convergente via unicast : collisions

**Expérience** :

- Requête : diffusion globale depuis 25
- Réponse : N diffusions point-à-point (OLSR, Optimised Link State Routing) vers 25



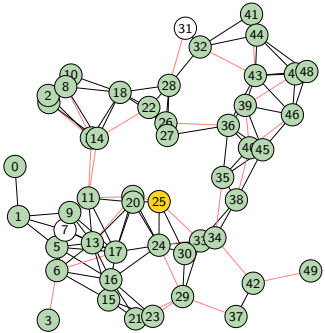


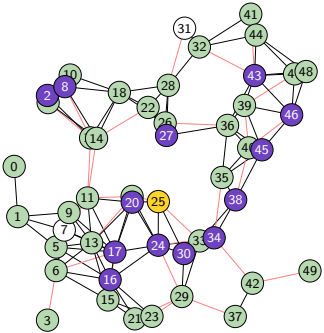


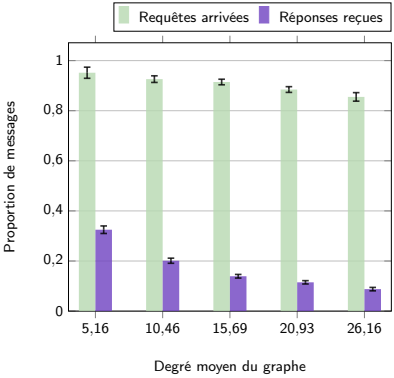
# Diffusion convergente via unicast : collisions

**Expérience** :

- Requête : diffusion globale depuis 25
- Réponse : N diffusions point-à-point (OLSR, Optimised Link State Routing) vers 25








**Les messages sont perdus au retour**

# Convergecast distribué

**Problème** :
Éviter les collisions occasionnées par les réponses synchronisées.

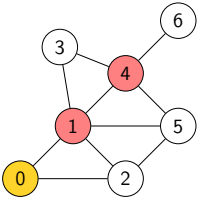
**Intuition** :

- Ordonnancer localement les messages de réponse en calculant des délais déterministes pour chacun d'entre eux
- Agréger les messages de réponse convergents

**Hypothèses** :

- Diffusion convergente suit une diffusion globale
- *Information partielle* sur le 2-voisinage
- Les nœuds gardent un état **enrichi** lors de la diffusion globale
- Les messages de requêtes enrichis d'informations de filiation

# Convergecast distribué, prérequis



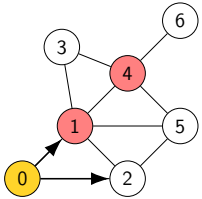

| Message | Père | Frères | MPR |
|---|---|---|---|
| | | | |

Messages

| Nœud | Id | Père | Frères | Date réc. | Fils | Relais MPR | Date retr. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |

États gardés dans les mémoires des nœuds

# Convergecast distribué, prérequis



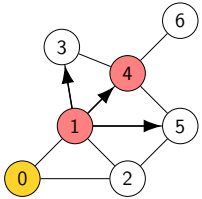

| Message | Père | Frères | MPR |
|---|---|---|---|
| $0 \rightarrow \langle 1,2 \rangle$ | - | - | $\langle 1 \rangle$ |

Messages

| Nœud | Id | Père | Frères | Date réc. | Fils | Relais MPR | Date retr. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | $\langle 0,0 \rangle$ | - | - | - | $\langle 1,2 \rangle$ | $\langle 1 \rangle$ | $t_1$ |
| 1 | $\langle 0,0 \rangle$ | 0 | $\langle 2 \rangle$ | $t_1$ | | | |
| 2 | $\langle 0,0 \rangle$ | 0 | $\langle 1 \rangle$ | $t_1$ | - | - | - |

États gardés dans les mémoires des nœuds

# Convergecast distribué, prérequis



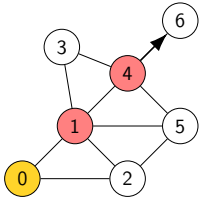

| Message | Père | Frères | MPR |
|---|---|---|---|
| $0 \rightarrow \langle 1,2 \rangle$ | - | - | $\langle 1 \rangle$ |
| $1 \rightarrow \langle 3,4,5 \rangle$ | 0 | $\langle 2 \rangle$ | $\langle 4 \rangle$ |

Messages

| Nœud | Id | Père | Frères | Date réc. | Fils | Relais MPR | Date retr. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | $\langle 0,0 \rangle$ | - | - | - | $\langle 1,2 \rangle$ | $\langle 1 \rangle$ | $t_1$ |
| 1 | $\langle 0,0 \rangle$ | 0 | $\langle 2 \rangle$ | $t_1$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ | $\langle 4 \rangle$ | $t_2$ |
| 2 | $\langle 0,0 \rangle$ | 0 | $\langle 1 \rangle$ | $t_1$ | - | - | - |
| 3 | $\langle 0,0 \rangle$ | 1 | $\langle 4,5 \rangle$ | $t_2$ | - | - | - |
| 4 | $\langle 0,0 \rangle$ | 1 | $\langle 3,5 \rangle$ | $t_2$ | | | |
| 5 | $\langle 0,0 \rangle$ | 1 | $\langle 3,4 \rangle$ | $t_2$ | - | - | - |

États gardés dans les mémoires des nœuds

# Convergecast distribué, prérequis




| Message | Père | Frères | MPR |
|---|---|---|---|
| $0 \rightarrow \langle 1,2 \rangle$ | - | - | $\langle 1 \rangle$ |
| $1 \rightarrow \langle 3,4,5 \rangle$ | 0 | $\langle 2 \rangle$ | $\langle 4 \rangle$ |
| $4 \rightarrow \langle 6 \rangle$ | 1 | $\langle 3,5 \rangle$ | - |

Messages

| Nœud | Id | Père | Frères | Date réc. | Fils | Relais MPR | Date retr. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | $\langle 0,0 \rangle$ | - | - | - | $\langle 1,2 \rangle$ | $\langle 1 \rangle$ | $t_1$ |
| 1 | $\langle 0,0 \rangle$ | 0 | $\langle 2 \rangle$ | $t_1$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ | $\langle 4 \rangle$ | $t_2$ |
| 2 | $\langle 0,0 \rangle$ | 0 | $\langle 1 \rangle$ | $t_1$ | - | - | - |
| 3 | $\langle 0,0 \rangle$ | 1 | $\langle 4,5 \rangle$ | $t_2$ | - | - | - |
| 4 | $\langle 0,0 \rangle$ | 1 | $\langle 3,5 \rangle$ | $t_2$ | $\langle 6 \rangle$ | $\langle \rangle$ | $t_3$ |
| 5 | $\langle 0,0 \rangle$ | 1 | $\langle 3,4 \rangle$ | $t_2$ | - | - | - |
| 6 | $\langle 0,0 \rangle$ | 4 | $\langle \rangle$ | $t_3$ | - | - | - |

États gardés dans les mémoires des nœuds

# Convergecast distribué, mécanismes

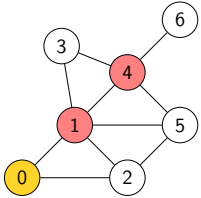
**Mécanisme 1**, *délais déterministes* :

- Une fratrie constitue un **ensemble de contention**
- Allouer à chaque frère un intervalle de temps **disjoint** pour répondre, dimensionné selon :
  - Taille du message
  - Bande passante du radiotransmetteur
  - Constante (temps ajouté par CSMA/CA)

**Mécanisme 2**, *agrégation messages* :

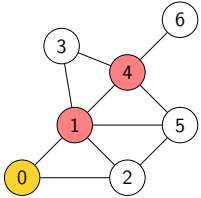
- Père connaît ses fils $\longrightarrow$ date de la réponse du dernier
- Ensemble des fils $\longrightarrow$ **ensemble d'agrégation**
- Délai d'attente déterministe pour agrégation avant renvoi au propre père

# Ordonnancement produit

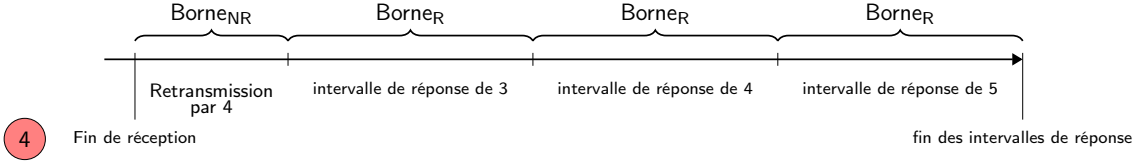



| Nœud | Ensemble de contention | Ensemble d'agrégation |
|---|---|---|
| 0 | - | $\langle 1,2 \rangle$ |
| 1 | $\langle 1,2 \rangle$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ |
| 2 | $\langle 1,2 \rangle$ | - |
| 3 | $\langle 3,4,5 \rangle$ | - |
| 4 | $\langle 3,4,5 \rangle$ | $\langle 6 \rangle$ |
| 5 | $\langle 3,4,5 \rangle$ | - |
| 6 | $\langle 6 \rangle$ | - |

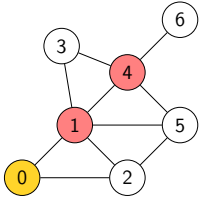
# Ordonnancement produit



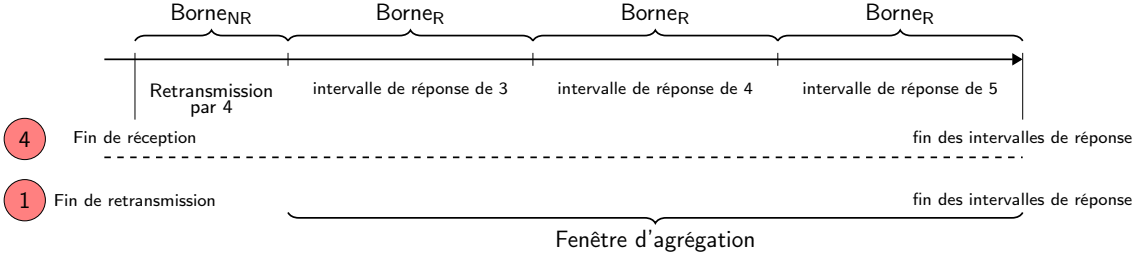

| Nœud | Ensemble de contention | Ensemble d'agrégation |
|---|---|---|
| 0 | - | $\langle 1,2 \rangle$ |
| 1 | $\langle 1,2 \rangle$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ |
| 2 | $\langle 1,2 \rangle$ | - |
| 3 | $\langle 3,4,5 \rangle$ | - |
| 4 | $\langle 3,4,5 \rangle$ | $\langle 6 \rangle$ |
| 5 | $\langle 3,4,5 \rangle$ | - |
| 6 | $\langle 6 \rangle$ | - |



# Ordonnancement produit




| Nœud | Ensemble de contention | Ensemble d'agrégation |
|---|---|---|
| 0 | - | ⟨1,2⟩ |
| 1 | ⟨1,2⟩ | ⟨3,4,5⟩ |
| 2 | ⟨1,2⟩ | - |
| 3 | ⟨3,4,5⟩ | - |
| 4 | ⟨3,4,5⟩ | ⟨6⟩ |
| 5 | ⟨3,4,5⟩ | - |
| 6 | ⟨6⟩ | - |



# Simulation

**OMNeT++/INET**, simulateur à événements discrets qui modélise :

- Radiotransmetteur WiFi
- CSMA/CA
- Collisions

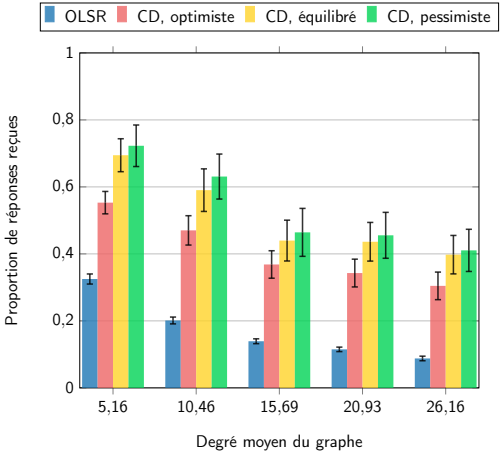
**Algorithmes comparés** :

- OLSR
- Convergecast distribué *optimiste* (transmission réussit au premier coup)
- Convergecast distribué *équilibré* (transmission réussit au plus tard au deuxième coup)
- Convergecast distribué *pessimiste* (transmission réussit au plus tard au dernier coup)

**Métriques** :

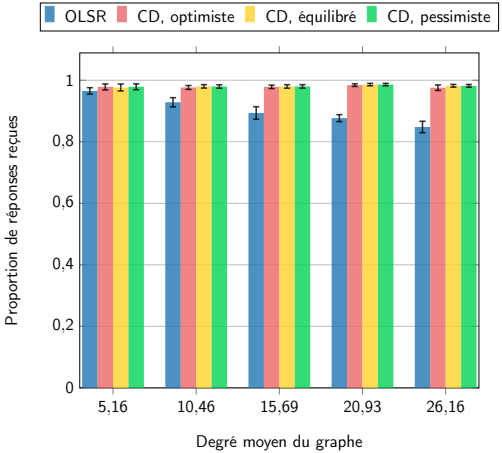
- Taux de réponse à la source des requêtes (proportion des réponses reçues)
- Quantité efficace d'octets envoyée (quantité d'octets envoyée / taux de réponse)
- Latence pour taux de réponse de 80% (depuis la date de départ de la requête)

# Taux de réponse, sans essais supplémentaires



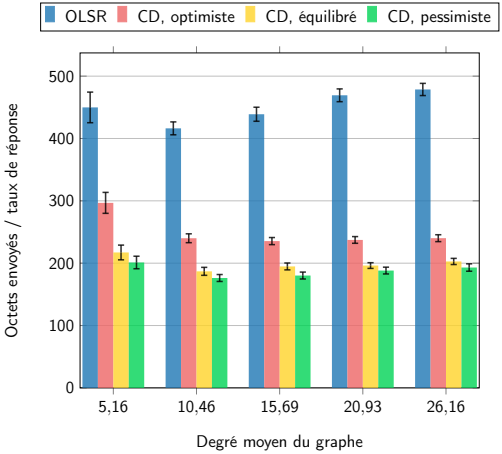

CD a un meilleur taux de réponse que OLSR sans essais supplémentaires

# Taux de réponse, avec essais supplémentaires



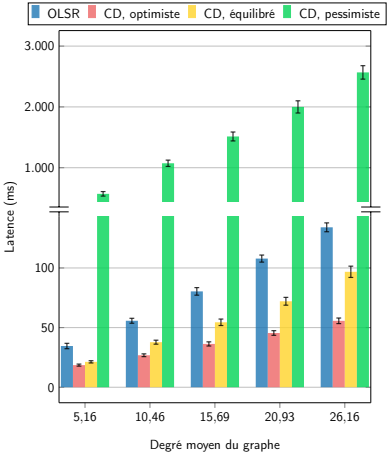

Avec essais supplémentaires, tous les algorithmes ont un bon taux de réponse

# Octets efficaces transmis




OLSR a besoin de beaucoup plus d'octets que CD pour atteindre le même taux de réponse

# Latence pour taux de réponse de 80%




Les retards déterministes permettent de baisser la latence par rapport aux essais supplémentaires

# Convergecast distribué, conclusion

**Mise en évidence des limites de OLSR** :

- Collisions liées aux réponses synchronisées

**Contribution 2, convergecast distribué**, nouvel algorithme de diffusion convergente :

- Ordonnancement local des messages de réponse
- Agrégation des messages de réponse convergents

**Résultats de simulation** :

- Meilleur taux de réponse (entre 2× et 5× OLSR)
- Moins coûteux en octets (moitié moins)
- Latence plus faible (entre 30% et 50% pour variante optimiste)

**Mécanisme complémentaire aux essais supplémentaires**

# Conclusion et perspectives

Contribution 1 : **MPR alternant** [COMPAS '22, NCA 22'] :

- Meilleure répartition sans coût supplémentaire

Contribution 2 : **Convergecast distribué** [ICPADS '24] :

- Meilleur taux de réponse, coût et latence plus faible

# Conclusion et perspectives

Contribution 1 : **MPR alternant** [COMPAS '22, NCA 22'] :

- Meilleure répartition sans coût supplémentaire

Contribution 2 : **Convergecast distribué** [ICPADS '24] :

- Meilleur taux de réponse, coût et latence plus faible

**Perspectives** :

1. CDS alternant :
   - MPR-CDS (Adjih 2002)
   - Généralisation de MPR alternant : calcul de plusieurs CDS
2. Implémentation de convergecast distribué :
   - Implémentation dans le noyau linux
   - Dépend de l'exposition des paramètres de CSMA/CA par le pilote
3. Diffusion globale synchronisée :
   - Dernière phase des algorithmes de consensus : acceptation
   - Rassemblement local des messages, puis diffusion globale
   - Diminuer le nombre de diffusions globales synchronisées

# Réserve

# CSMA/CA, paramètres

| Quantité | Notes |
|---|---|
| DIFS | Période d'attente initiale suffisante pour envoi immédiat |
| ST | Période d'attente pour décrémentation compteur aléatoire |
| SIFS | Période d'attente avant envoi de la trame d'acquittement |
| AckT | Période d'attente de la trame d'acquittement |
| MaxRetry | Nombre maximal de tentatives d'envoi |
| CWmin | Valeur minimale de la borne supérieure du compteur aléatoire |
| CWmax | Valeur maximale de la borne supérieure du compteur aléatoire |

Table – Tableau récapitulatif des paramètres de CSMA/CA

# CSMA/CA, retardement aléatoire

**Algorithme 1 :** CSMA/CA, avant envoi d'une trame

**Entrées :**

$M$ : entier, taille maximale du compteur

$F$ : trame à envoyer

```
si Canal libre pendant DIFS alors
    envoi(F);
    retourner ;
variable locale (entier) C ⟵ 𝒰([[0; M]]);
tant que C > 0 faire
    si Canal libre pendant ST alors
        C ⟵ C − 1;
envoi(F);
retourner ;
```

# CSMA/CA, essai supplémentaire (1)

**Algorithme 2 :** CSMA/CA, sur réception d'une trame

**Entrées :**
$F$ : trame MAC

```
variable globale (adresse) A;                    /* Adresse MAC personnelle */
/* Adresse MAC de diffusion globale                                         */
variable globale (adresse) B ⟵ ff : ff : ff : ff : ff : ff;
si trame_incorrecte(F) alors
    ignorer(F);
    retourner ;
si F.RA ≠ A ∧ F.RA ≠ B alors
    ignorer(F);
    retourner ;
variable locale (trame) Ack;
si F.RA ≠ B alors
    envoi_retarde(Ack,SIFS,M.TA);
delivrer(F);
```

# CSMA/CA, essai supplémentaire (2)

**Algorithme 3 :** CSMA/CA, après envoi d'une trame

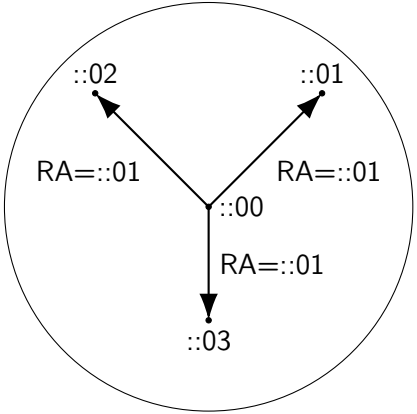
**Entrées :**

$M$ : entier, taille maximale du compteur

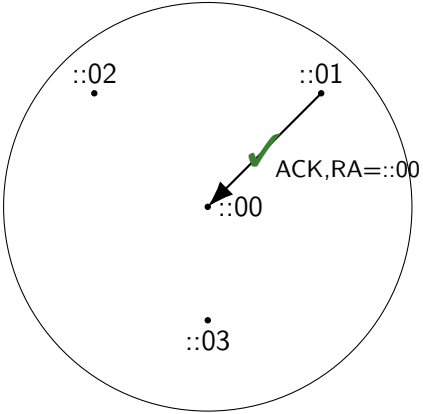
$F$ : trame envoyée

```
/* Adresse MAC de diffusion globale                                    */
variable globale (adresse) B ⟵ ff : ff : ff : ff : ff : ff;
si F.RA = B alors
    retourner ;
si attendre(Ack,AckT) = ⊥ ∧ F.indice_tentative < MaxRetry alors
    M ⟵ augmenter_delai(M);
    essai_supplementaire(F,M);
```

# CSMA/CA, essai supplémentaire, trame mono-adressée



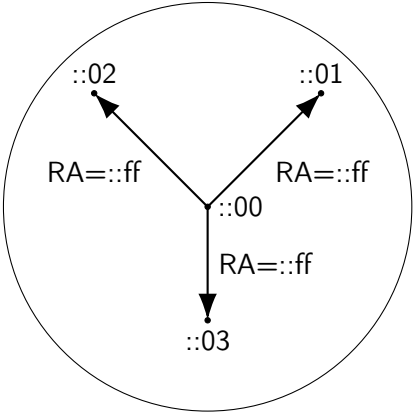

(a) Envoi message point-à-point de ::00 vers ::01



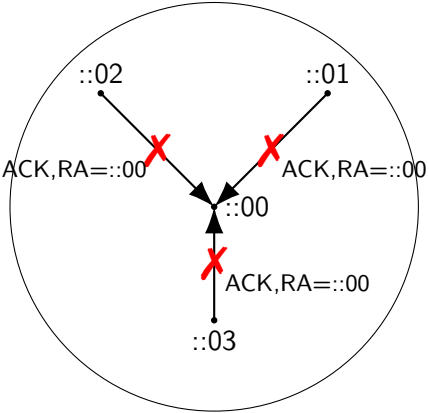

(b) Seul ::01 traite le message et acquitte, après SIFS

Figure – Mécanisme d'acquittement, message point-à-point

# CSMA/CA, pas d'essai supplémentaire, trame multi-adressée




(a) Envoi message en diffusion large de ::00 vers ::ff




(b) Si tous les destinataires acquittent, la collision est inévitable

Figure – Absence d'acquittement pour les messages de diffusion large

# Définitions

## $k$-voisinage large

Le $k$-voisinage large d'un nœud $u$ est l'ensemble des nœuds du graphe situés à une distance de $u$ inférieure ou égale à $k$. Plus formellement :

$$M_k(u) = \{v \in V \mid d(u,v) \leq k\}$$

## $k$-voisinage strict

Le $k$-voisinage strict d'un nœud $u$ est l'ensemble des nœuds du graphe situés à une distance de $u$ égale à $k$. Plus formellement :

$$N_k(u) = \{v \in V \mid d(u,v) = k\}$$

## Propriétés

- $\forall k > 1, N_k(u) = M_k(u) \setminus M_{k-1}(u)$
- $\forall k > 0, M_k(u) \subseteq M_{k+1}(u)$

# Définitions (suite)

## Information complète sur le $k$-voisinage

On dit qu'un nœud $u$ d'un graphe $G$ dispose de l'information complète sur son $k$-voisinage si, et seulement si, il connaît le sous-graphe de $G$ induit par son $k$-voisinage large.

## Information partielle sur le $k$-voisinage

On dit qu'un nœud $u$ d'un graphe $G$ dispose de l'information partielle sur son $k$-voisinage si, et seulement si, il connaît :

- le sous-graphe de $G$ induit par son $k-1$-voisinage large
- son $k$-voisinage strict
- l'ensemble des arêtes entre un nœud du $k$-voisinage strict d'une part, et un nœud du $k-1$ voisinage strict d'autre part.

# Flooding

**Algorithme 4 :** Flooding, sur réception d'un message M

**Entrées :**

$M$ : message

```
/* Mémoire des messages délivrés et retransmis                    */
variable globale (ensemble) R;
si M ∈ R alors
    retourner ;
R ⟵ R ∪ {M};
delivrer(M);
retransmettre(M);
retourner ;
```

# MPR

**Algorithme 5** : Heuristique de sélection des relais MPR

**Entrées :**

$N_1$ : ensemble, 1-voisinage
$N_2$ : ensemble, 2-voisinage
$N_2[n_j \in N_1] \mapsto \{n_k, \dots\}$ : application de $N_1$ dans $N_2$, liens entre le 1- et 2-voisinage

```
/* nœuds à couvrir                                                    */
```

1 *variable locale (ensemble)* $U \longleftarrow \bigcup_{n_j \in N_1} N_2[n_j]$;

2 *variable locale (ensemble)* $R \longleftarrow \emptyset$ ; `/* relais */`

3 *variable locale (nœud)* $t \longleftarrow \perp$;

4 **pour tous les** $n_j \in U$ **faire**

5     **si** $\exists! n_i \in N_1 | n_j \in N_2[n_i]$ **alors**

6         $R \longleftarrow R \cup \{n_i\}$;

7         $U \longleftarrow U \setminus N_2[n_i]$;

8 **tant que** $U \neq \emptyset$ **faire**

9     $t \longleftarrow \arg\max_{n_i \in N_1} (|N_2[n_i] \cap U|)$;

10     $R \longleftarrow R \cup \{t\}$;

11     $U \longleftarrow U \setminus N_2[t]$;

12 **retourner** $R$;

# MPR alternant

**Entrées :**
**Les mêmes que MPR statique**

*variable locale (ensemble)* $U \longleftarrow \bigcup_{n_j \in N_1} N_2[n_j]$ ; /* nœuds à couvrir */
*variable locale (liste d'ensembles)* $R \longleftarrow []$ ; /* liste des ensembles de relais */
*variable locale (ensemble)* $F \longleftarrow \emptyset$ ; /* relais interdits */
*variable locale (ensemble)* $C \longleftarrow \emptyset$ ; /* ensemble courant */
*variable locale (scalaire)* $i \longleftarrow 0$ ; /* index de liste */
*variable locale (nœud)* $t \longleftarrow \perp$;
**tant que** *vrai* **faire**
  **pour tous les** $n_j \in U$ **faire**
    **si** $\exists! n_i \in N_1 | n_j \in N_2[n_i]$ **alors**
      $C \longleftarrow C \cup \{n_i\}$ ; $U \longleftarrow U \setminus N_2[n_i]$;
  $R[i] \longleftarrow C$;
  **si** $U = \emptyset$ **alors**
    **retourner** $R$;
  **tant que** $U \neq \emptyset$ **faire**
    **si** $(\bigcup_{n_i \in N_1 \cap \overline{F}} N_2[n_i]) \cap U = \emptyset$ **alors**
      **retourner** $R$ ;
    $t \longleftarrow \arg\max_{n_i \in N_1 \cap \overline{F}} (|N_2[n_i] \cap U|)$ ; $C \longleftarrow C \cup \{t\}$ ; $F \longleftarrow F \cup \{t\}$ ;$U \longleftarrow U \setminus N_2[t]$;
  $R[i] \longleftarrow C$ ;$C \longleftarrow \emptyset$ ;$U \longleftarrow \bigcup_{n_j \in N_1} N_2[n_j]$ ; $i \longleftarrow i + 1$;

# Prérequis convergecast distribué

État enrichi d'une diffusion globale :

- le transmetteur direct du message (le "père")
- les autre récepteurs **inédits** du même message (les "frères"), moins ceux (les "oncles") qui l'avaient déjà reçu auparavant par le transmetteur du transmetteur (le "grand-père")
- l'estampille de la transmission
- dans le cas d'une retransmission :
  - les récepteurs **inédits** de la retransmission (les "fils")
  - l'ensemble MPR (un sous-ensemble du précédent)
  - l'estampille de la retransmission

Les informations à ajouter à un message qu'on envoie :

- son père
- ses frères

# Ordonnancement produit

| | Intervalle de temps | Ém. | Type mess. | Dest. | CS | AS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $[0; b]$ | 0 | Req. | $\langle 1,2 \rangle$ | - | $\langle 1,2 \rangle$ |
| 2 | $[b; 2b]$ | 1 | Req. | $\langle 3,4,5 \rangle$ | - | $\langle 3,4,5 \rangle$ |
| 3 | $[2b; 3b]$ | 4 | Req. | $\langle 6 \rangle$ | - | $\langle 6 \rangle$ |
| 4 | $[b + \text{Borne}_{NR}; b + \text{Borne}_{NR} + \text{Borne}_R]$ | 1 | Rép. 1 | $\langle 0 \rangle$ | $\langle 1,2 \rangle$ | $\langle 1,2 \rangle$ |
| 5 | $[b + \text{Borne}_{NR} + \text{Borne}_R; b + \text{Borne}_{NR} + 2\text{Borne}_R]$ | 2 | Rép. 2 | $\langle 0 \rangle$ | $\langle 1,2 \rangle$ | $\langle 1,2 \rangle$ |
| 6 | $[2b + \text{Borne}_{NR}; 2b + \text{Borne}_{NR} + \text{Borne}_R]$ | 3 | Rép. 3 | $\langle 1 \rangle$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ |
| 7 | $[2b + \text{Borne}_{NR} + \text{Borne}_R; 2b + \text{Borne}_{NR} + 2\text{Borne}_R]$ | 4 | Rép. 4 | $\langle 1 \rangle$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ |
| 8 | $[2b + \text{Borne}_{NR} + 2\text{Borne}_R; 2b + \text{Borne}_{NR} + 3\text{Borne}_R]$ | 5 | Rép. 5 | $\langle 1 \rangle$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ | $\langle 3,4,5 \rangle$ |
| 9 | $[2b + \text{Borne}_{NR} + 3\text{Borne}_R; 2b + \text{Borne}_{NR} + 4\text{Borne}_R]$ | 1 | Rép. $\langle 3,4,5 \rangle$ | $\langle 0 \rangle$ | - | - |
| 10 | $[3b; 3b + \text{Borne}_R]$ | 6 | Rép. 6 | $\langle 4 \rangle$ | $\langle 6 \rangle$ | $\langle 6 \rangle$ |
| 11 | $[2b + \text{Borne}_{NR} + 3\text{Borne}_R; 2b + \text{Borne}_{NR} + 4\text{Borne}_R]$ | 4 | Rép. 6 | $\langle 1 \rangle$ | - | - |
| 12 | $[2b + \text{Borne}_{NR} + 4\text{Borne}_R; 2b + \text{Borne}_{NR} + 5\text{Borne}_R]$ | 1 | Rép. 6 | $\langle 0 \rangle$ | - | - |

# Calcul des bornes

$$\text{Borne}_{\text{NR}} = \frac{T}{B} + \text{CWmin} * \text{ST} \tag{1}$$

$$\text{Borne}_{\text{R}} = \sum_{r=1}^{\text{MaxRetry}} \left( \frac{T}{B} + \text{CW}_r * \text{ST} + \text{AckTimeout} \right) \tag{2}$$

$$\text{CW}_r = min(\text{CW}_{max}, \text{CW}_{min} * 2^{r-1}) \tag{3}$$

# Convergecast distribué, paramètres

| Quantité | Notes |
|---|---|
| $\text{Borne}_{NR}$ | Borne supérieure du temps pris par une diffusion globale (CSMA/CA compris) |
| $\text{Borne}_{R}$ | Borne supérieure du temps pris par une diffusion mono-adressée (CSMA/CA compris) |
| $\text{DR}_u$ | Date (locale au nœud $u$) de fin de réception du message de requête |
| ER | Taille de l'ensemble des retransmetteurs du message de requête |
| $\text{IntRép}_u(i)$ | Intervalle de réponse pour le nœud d'indice $i$ dans l'ensemble de contention selon $u$ |
| CS | Ensemble de contention |
| $\text{FinIntRép}_u$ | Date de fin de tous les intervalles de réponse selon $u$ |
| $\text{DRetr}_u$ | Date (locale au nœud $u$) de fin de retransmission du message de requête |
| AS | Ensemble d'agrégation |
| $\text{FA}_u$ | Fenêtre d'agrégation selon $u$ |