

Vers une structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc* : cas des réseaux de capteurs sans fil

Mandicou BA

mandicou.ba@univ-reims.fr

Soutenance de thèse

Laboratoire CReSTIC - Équipe SysCom

Mercredi 21 mai 2014



Plan

- 1 Contexte et Motivations
- 2 SDEAC : une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc
- 3 SDEAC dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil
- 4 Acheminement de l'information à l'aide de SDEAC
- 5 Conclusion et perspectives

Sommaire

- 1 Contexte et Motivations
 - Réseaux ad hoc
 - Réduction des communications
 - Tolérance aux pannes transitoires
 - Problématique de recherche
- 2 SDEAC : une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc
- 3 SDEAC dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil
- 4 Acheminement de l'information à l'aide de SDEAC
- 5 Conclusion et perspectives

Les réseaux informatiques

Quelques usages des réseaux informatiques



Militaires



Transports



Domestiques

Les réseaux informatiques

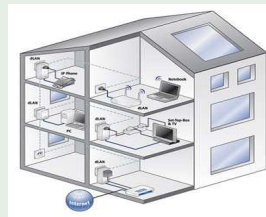
Quelques usages des réseaux informatiques



Militaires



Transports



Domestiques

**Réseaux
avec
Infrastructure**

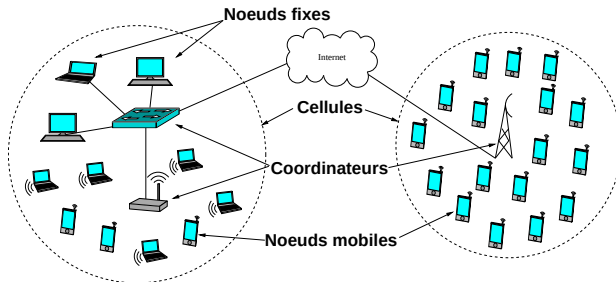
Classification des
Réseaux informatiques

**Réseaux
sans
Infrastructure**

Réseaux avec infrastructure

Caractéristiques

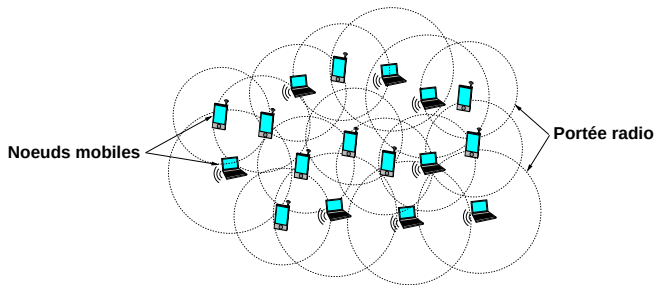
- ➡ Organisation en cellules ou zones
- ➡ Coordinateur ou Station de base
- ➡ Médium de communication : filaire ou sans fil
- ➡ Nœuds fixes ou mobiles
- ➡ Applications : Wifi d'entreprise, Téléphonie IP, Téléphonie GSM, ...



Réseaux sans infrastructure : les réseaux *ad hoc*

Caractéristiques

- ➡ Aucune entité de centralisation
- ➡ Médium sans fil $\Rightarrow$ nœuds fixes ou mobiles
- ➡ Nœuds mobiles $\Rightarrow$ *Mobile Ad hoc NETwork* (MANET)
- ➡ Applications: militaire, services d'urgence, surveillance, ...

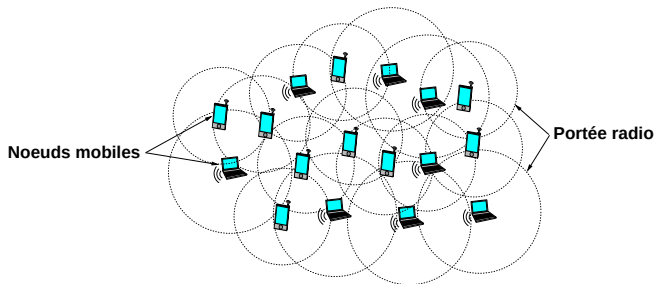


Communications - Défaillances

Réseaux sans infrastructure : les réseaux *ad hoc*

Caractéristiques

- ➡ Aucune entité de centralisation
- ➡ Médium sans fil $\Rightarrow$ nœuds fixes ou mobiles
- ➡ Nœuds mobiles $\Rightarrow$ *Mobile Ad hoc NETwork* (MANET)
- ➡ Applications: militaire, services d'urgence, surveillance, ...

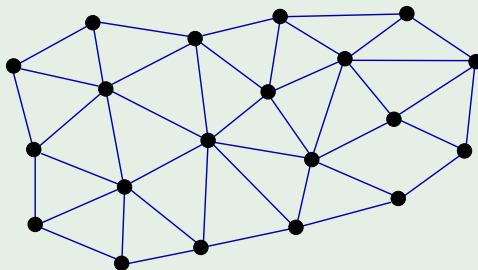


Communications - Défaillances

Modélisation des réseaux *ad hoc*

Modélisation de la topologie réseau

➡ Graphe connexe et non-orienté $G = (V, E)$



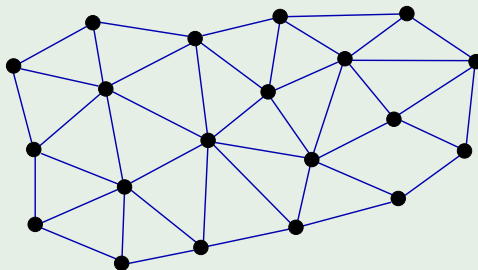
Modèle de communication adopté

➡ Modèle asynchrone à passage de messages

Modélisation des réseaux *ad hoc*

Modélisation de la topologie réseau

➡ Graphe connexe et non-orienté $G = (V, E)$



Modèle de communication adopté

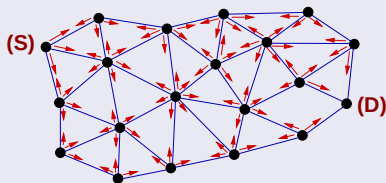
➡ Modèle asynchrone à passage de messages

Communications dans les réseaux *ad hoc*

Solution classique : la diffusion

- Algorithme d'écho [Chang'1980]

Principe



Inconvénients

- Coût en messages de $2m$
 - ➡ Saturation du réseau
 - ➡ Surconsommation

Réduction des communications

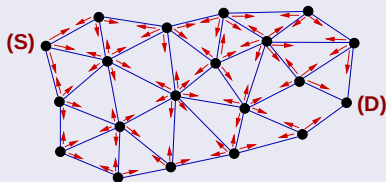
- Structuration du réseau en arbre ou en *clusters*
 - ➡ Structuration en *clusters* adoptée

Communications dans les réseaux *ad hoc*

Solution classique : la diffusion

- Algorithme d'écho [Chang'1980]

Principe



Inconvénients

- Coût en messages de $2m$
 - ☞ Saturation du réseau
 - ☞ Surconsommation

Réduction des communications

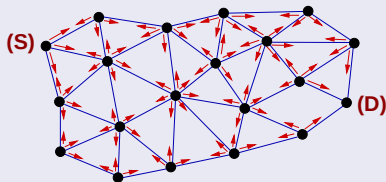
- Structuration du réseau en arbre ou en *clusters*
 - ☞ Structuration en *clusters* adoptée

Communications dans les réseaux *ad hoc*

Solution classique : la diffusion

- Algorithme d'écho [Chang'1980]

Principe



Inconvénients

- Coût en messages de $2m$
 - ☞ Saturation du réseau
 - ☞ Surconsommation

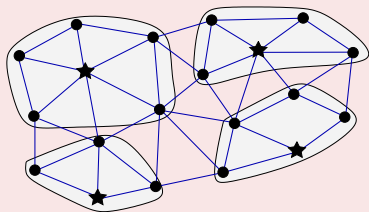
Réduction des communications

- Structuration du réseau en arbre ou en *clusters*
 - ☞ Structuration en *clusters* adoptée

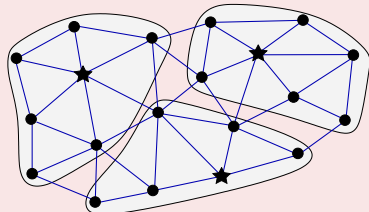
Structuration des réseaux *ad hoc* en *clusters*

Définitions

- ➡ *Un cluster est un sous-graphe connexe du graphe du réseau.*
- ➡ *Un cluster à k sauts est un cluster ayant un diamètre d'au plus $2k$.*
- ➡ *Un Cluster-Head orchestre les communications dans chaque cluster.*



➡ *Clusters à 1 saut*



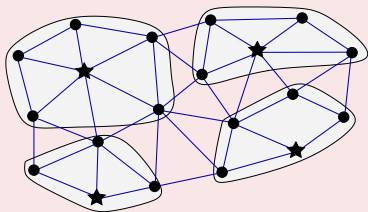
➡ *Clusters à k sauts*

Clustering à k sauts adopté

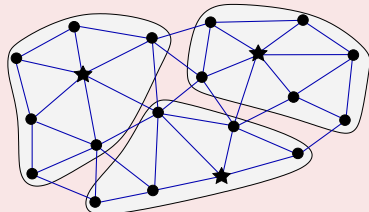
Structuration des réseaux *ad hoc* en *clusters*

Définitions

- ➡ *Un cluster est un sous-graphe connexe du graphe du réseau.*
- ➡ *Un cluster à k sauts est un cluster ayant un diamètre d'au plus $2k$.*
- ➡ *Un Cluster-Head orchestre les communications dans chaque cluster.*



➡ *Clusters à 1 saut*



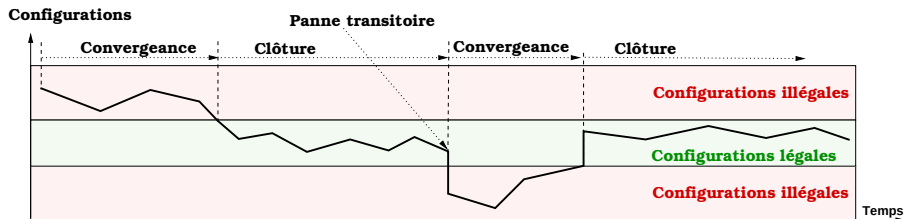
➡ *Clusters à k sauts*

Clustering à k sauts adopté

Auto-stabilisation

Système auto-stabilisant [Dijkstra'1974]

« Quelle que soit sa configuration de départ, un système auto-stabilisant recouvre un comportement correct en un nombre fini d'étapes. »



Pannes transitoires

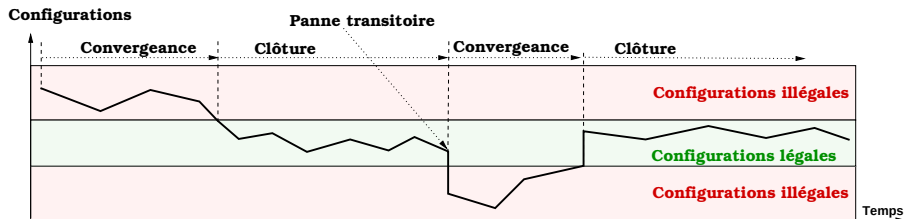
- Données traitées, reçues, émises
- Topologie réseau
- État d'un nœud - Configuration du système

Code supposé sûr

Auto-stabilisation

Système auto-stabilisant [Dijkstra'1974]

« Quelle que soit sa configuration de départ, un système auto-stabilisant recouvre un comportement correct en un nombre fini d'étapes. »



Pannes transitoires

- Données traitées, reçues, émises
- Topologie réseau
- État d'un nœud - Configuration du système

Code supposé sûr

Auto-stabilisation

Avantages

- Aucune initialisation
- Systèmes dynamiques
- Pas de détecteur de pannes

Inconvénients

- Exécution continue
- Toute panne peut **potentiellement** mener vers une configuration illégale
- Sensible à la périodicité des pannes

Auto-stabilisation

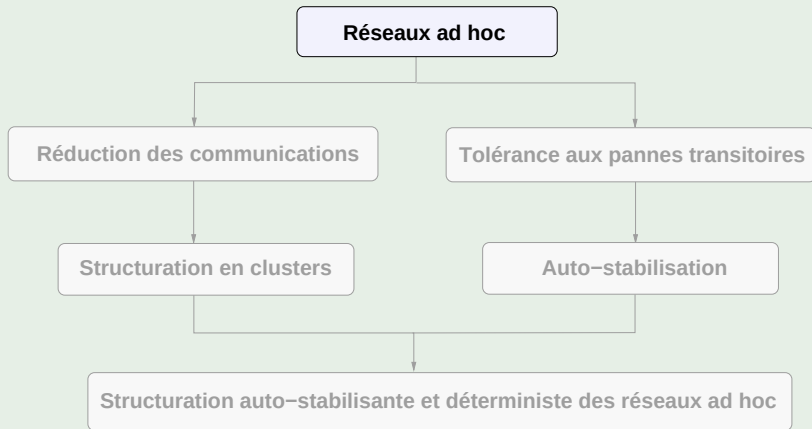
Avantages

- Aucune initialisation
- Systèmes dynamiques
- Pas de détecteur de pannes

Inconvénients

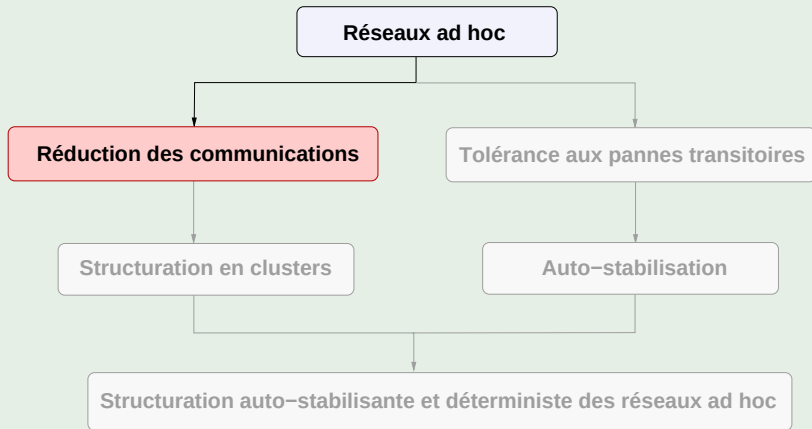
- Exécution continue
- Toute panne peut **potentiellement** mener vers une configuration illégale
- Sensible à la périodicité des pannes

Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*



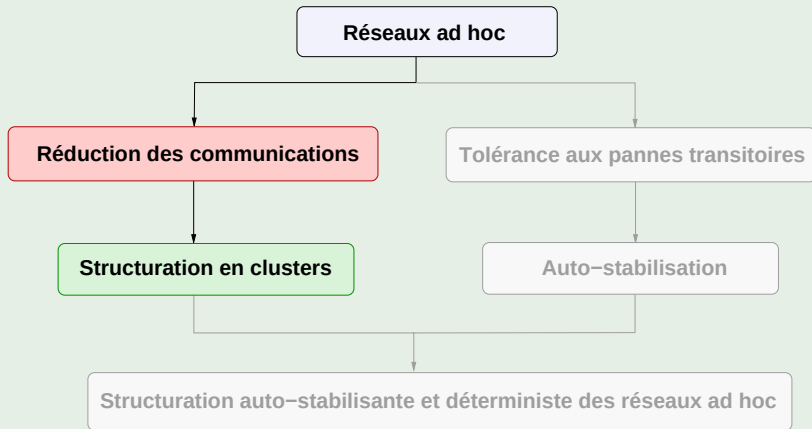
Solutions existantes

Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*



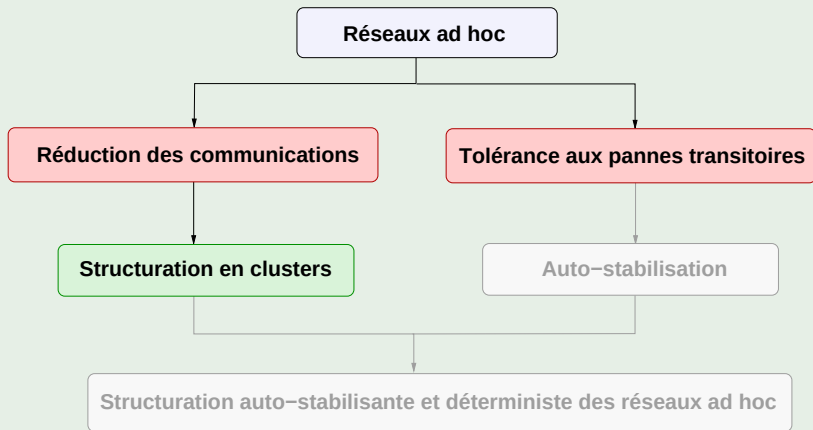
Solutions existantes

Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*



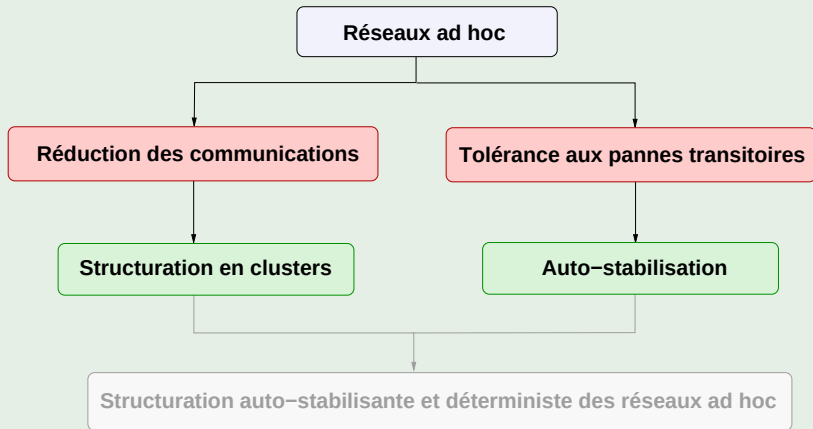
Solutions existantes

Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*



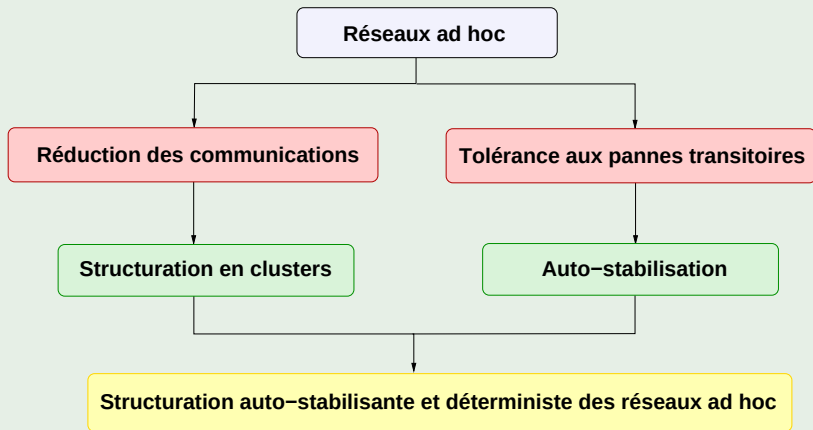
Solutions existantes

Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*



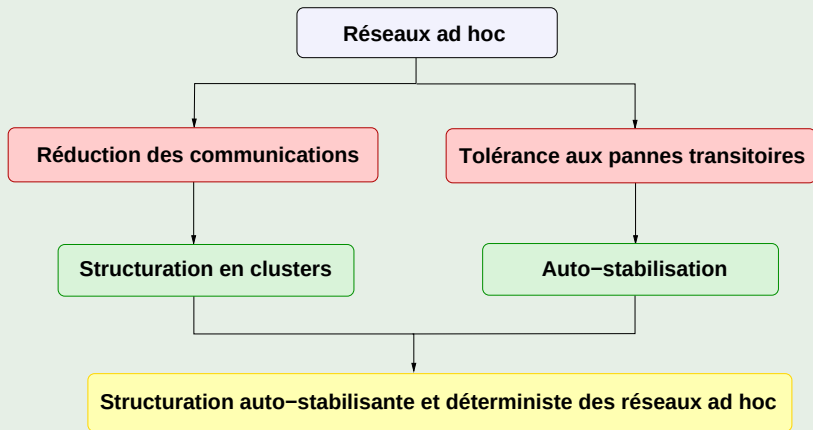
Solutions existantes

Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*



Solutions existantes

Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*



Solutions existantes

Solutions fondées sur un modèle à passage de messages

☞ Solutions construisant des *clusters* à k sauts

☞ (x,k) -Clustering [Larson et Tsigas'2011]

- Métrique d'identité maximale
- Voisinage à distance k sauts
- Chaque nœud a x *cluster-heads* situés jusqu'à distance k

☞ k -Density [Mitton et al.'2005]

- Métrique de densité
- Voisinage à distance $k + 1$ sauts
- Chaque nœud a 1 *cluster-head* situé jusqu'à distance k

Observation générale

Voisinage à k sauts

Solutions fondées sur un modèle à passage de messages

☞ Solutions construisant des *clusters* à k sauts

☞ (x,k) -Clustering [Larson et Tsigas'2011]

- Métrique d'identité maximale
- Voisinage à distance k sauts
- Chaque nœud a x *cluster-heads* situés jusqu'à distance k

☞ k -Density [Mitton et al.'2005]

- Métrique de densité
- Voisinage à distance $k + 1$ sauts
- Chaque nœud a 1 *cluster-head* situé jusqu'à distance k

Observation générale

Voisinage à k sauts

Synthèse de notre problématique de recherche

Objectif

- ➡ *Élaboration d'une nouvelle solution simple et efficace de structuration des réseaux ad hoc.*

Dans quels buts

- ➡ Réduire les communications
- ➡ Tolérer les pannes transitoires

Par quels moyens

- ➡ Construction de *clusters* à k sauts
- ➡ Auto-stabilisation

Synthèse de notre problématique de recherche

Objectif

- ➡ *Élaboration d'une nouvelle solution simple et efficace de structuration des réseaux ad hoc.*

Dans quels buts

- ➡ Réduire les communications
- ➡ Tolérer les pannes transitoires

Par quels moyens

- ➡ Construction de *clusters* à k sauts
- ➡ Auto-stabilisation

Synthèse de notre problématique de recherche

Objectif

- ➡ *Élaboration d'une nouvelle solution simple et efficace de structuration des réseaux ad hoc.*

Dans quels buts

- ➡ Réduire les communications
- ➡ Tolérer les pannes transitoires

Par quels moyens

- ➡ Construction de *clusters* à k sauts
- ➡ Auto-stabilisation

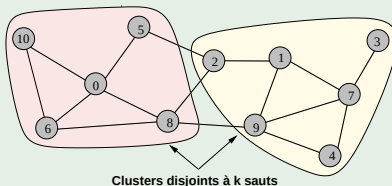
Sommaire

- 1 Contexte et Motivations
- 2 **SDEAC : une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc**
 - Présentation de SDEAC
 - Preuves formelles
 - Évaluations de performances moyennes
 - Synthèse
- 3 SDEAC dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil
- 4 Acheminement de l'information à l'aide de SDEAC
- 5 Conclusion et perspectives

SDEAC : self-Stabilizing Distributed Energy-Aware Clustering

Objectif

- Voisinage à distance 1 $\Rightarrow$ construction de *clusters* à k sauts

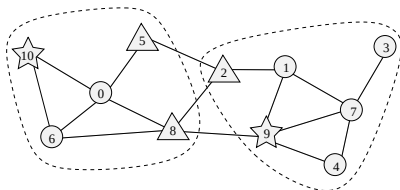


Principe d'exécution

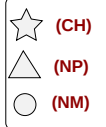
- Critère de l'Identité maximale
- Rounds de trois phases
 - 1 Mises à jour locales
 - 2 Vérification de la cohérence
 - 3 Clustering

Organisation des *clusters*

- ✎ Identifiant unique pour chaque nœud
- ✎ *Cluster-Head* (**CH**), Nœud Passerelle (**NP**) ou Nœud Membre (**NM**)
- ✎ Identifiant unique pour chaque *cluster*
- ✎ Diamètre maximal $2k$: $\forall u \in G, 0 \leq \text{dist}_{(u, CH_u)} \leq k$
- ✎ 4 variables: id_u , cl_u , $statut_u$ et $\text{dist}_{(u, CH_u)}$
 - ⇒ $\text{hello}(id_u, cl_u, statut_u, \text{dist}_{(u, CH_u)})$ échangés à distance 1



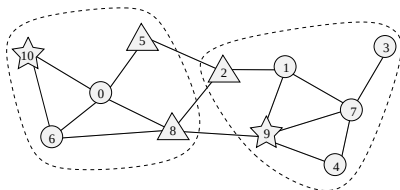
Légende



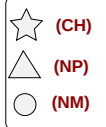
Comment construire les *clusters*

Organisation des *clusters*

- ☞ Identifiant unique pour chaque nœud
- ☞ *Cluster-Head* (**CH**), Nœud Passerelle (**NP**) ou Nœud Membre (**NM**)
- ☞ Identifiant unique pour chaque *cluster*
- ☞ Diamètre maximal $2k$: $\forall u \in G, 0 \leq \text{dist}_{(u, CH_u)} \leq k$
- ☞ 4 variables: id_u , cl_u , $statut_u$ et $\text{dist}_{(u, CH_u)}$
 - ⇒ $\text{hello}(id_u, cl_u, statut_u, \text{dist}_{(u, CH_u)})$ échangés à distance 1

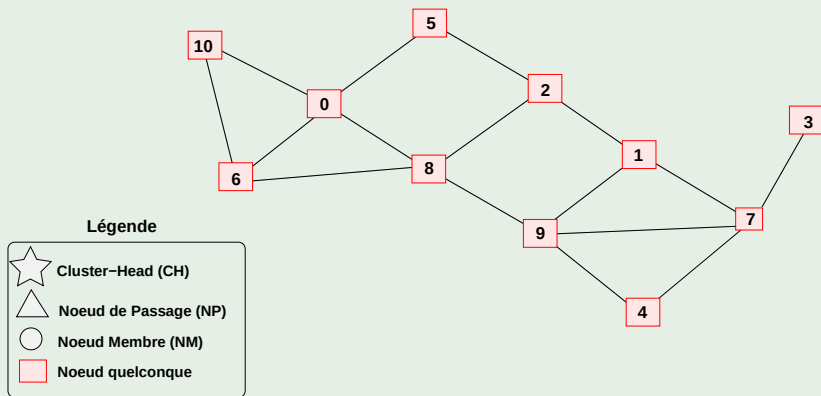


Légende



Comment construire les *clusters*

Illustration de construction des *clusters* ($k = 2$)



Validation de SDEAC : Preuve formelle - Simulation

The diagram illustrates a network topology with 11 nodes, numbered 0 through 10. The nodes are represented by red squares, indicating they are 'Noeud quelconque' (Any Node). The connections between nodes are represented by blue arrows, indicating the 'hello(id,cl,statut,dist)' message exchange. The legend defines the symbols used in the diagram:

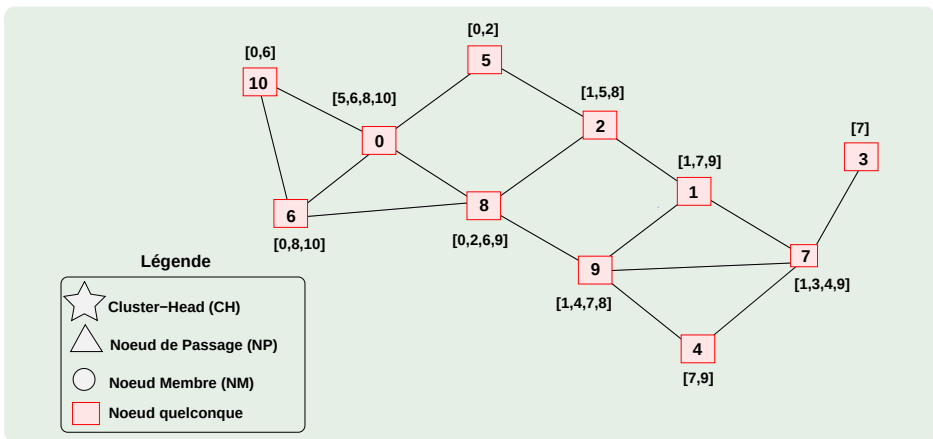
- Cluster-Head (CH): Represented by a star symbol.
- Noeud de Passage (NP): Represented by a triangle symbol.
- Noeud Membre (NM): Represented by a circle symbol.
- Noeud quelconque: Represented by a square symbol.
- hello(id,cl,statut,dist): Represented by a blue arrow.

The network structure shows a central cluster of nodes (0, 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9) with additional nodes (3, 4, 10) connected to the periphery. The connections are as follows:

- Node 0 is connected to nodes 5, 6, 8, and 10.
- Node 1 is connected to nodes 2, 7, and 9.
- Node 2 is connected to nodes 0, 1, and 5.
- Node 3 is connected to node 7.
- Node 4 is connected to nodes 7 and 9.
- Node 5 is connected to nodes 0 and 2.
- Node 6 is connected to nodes 0 and 8.
- Node 7 is connected to nodes 1, 3, 4, and 9.
- Node 8 is connected to nodes 0 and 6.
- Node 9 is connected to nodes 1, 4, and 7.
- Node 10 is connected to node 0.



Illustration de construction des *clusters* ($k = 2$)

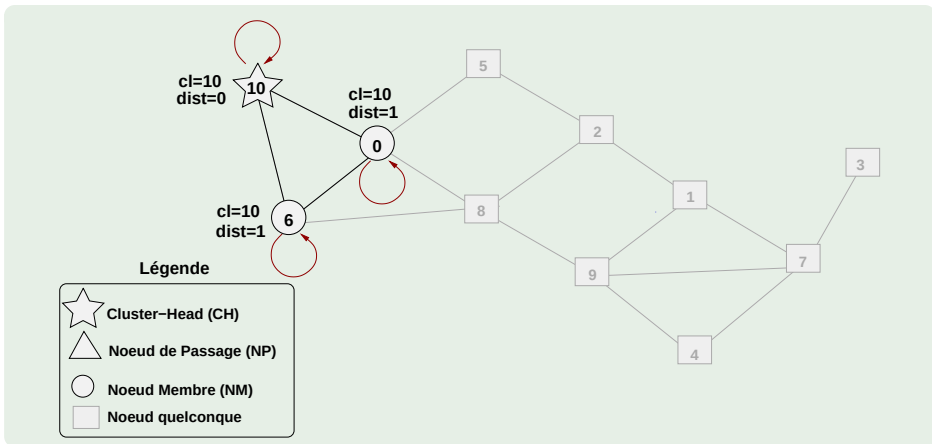


Validation de SDEAC : Preuve formelle - Simulation



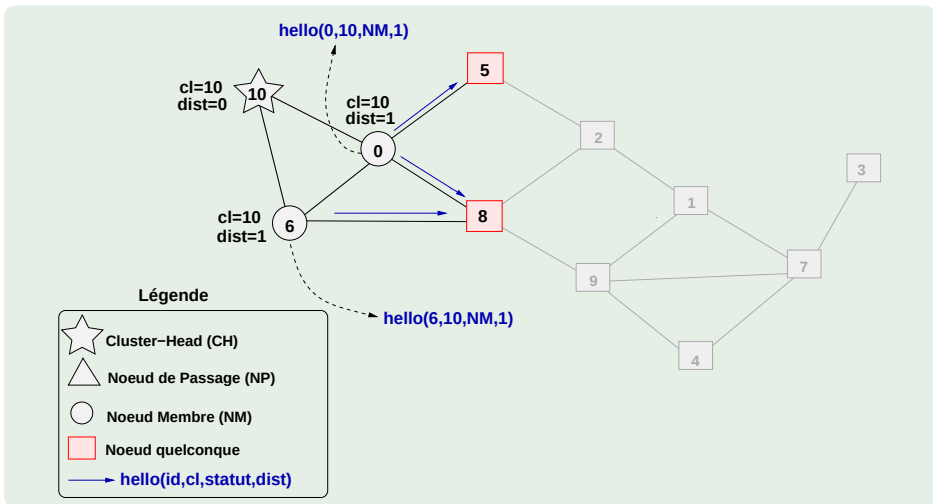
EA 3804 - SysCom)	Structuration des réseaux ad hoc	Mercure
-------------------	----------------------------------	---------

Illustration de construction des *clusters* ($k = 2$)



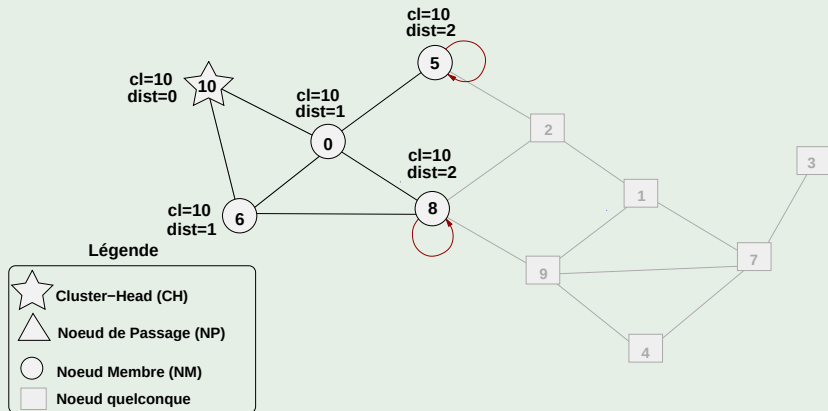
Validation de SDEAC : Preuve formelle - Simulation

Illustration de construction des *clusters* ($k = 2$)



Validation de SDEAC : Preuve formelle - Simulation

Illustration de construction des *clusters* ($k = 2$)



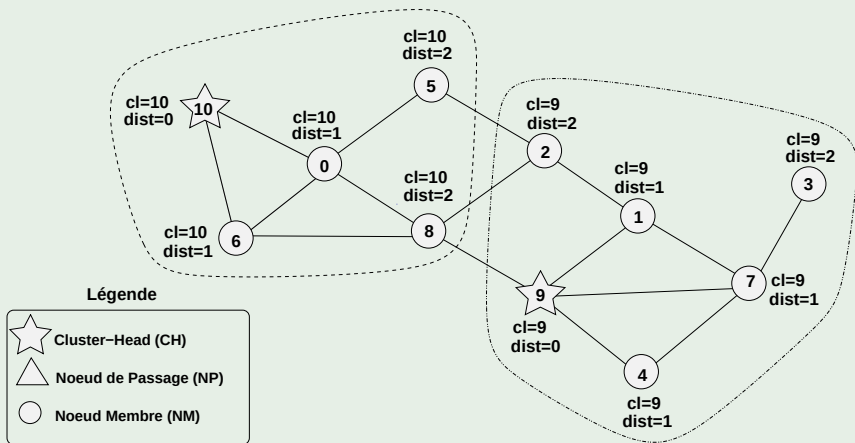
Validation de SDEAC : Preuve formelle - Simulation

The diagram shows a network topology. A dashed oval encloses a central cluster. Inside this cluster, node 10 is a star shape (Cluster-Head, CH) with 'cl=10' and 'dist=0'. It is connected to nodes 0, 5, and 6. Node 0 is a circle (Noeud Membre, NM) with 'cl=10' and 'dist=1'. Node 5 is a circle (NM) with 'cl=10' and 'dist=2'. Node 6 is a circle (NM) with 'cl=10' and 'dist=1'. Node 8 is a circle (NM) with 'cl=10' and 'dist=2'. Node 8 is connected to nodes 0, 5, and 9. Node 9 is a square (Noeud quelconque) connected to nodes 2, 1, 4, and 7. Node 2 is a square connected to nodes 5 and 1. Node 1 is a square connected to nodes 2, 9, and 7. Node 4 is a square connected to nodes 9 and 7. Node 7 is a square connected to nodes 1, 4, 9, and 3. Node 3 is a square connected to node 7.

Légende

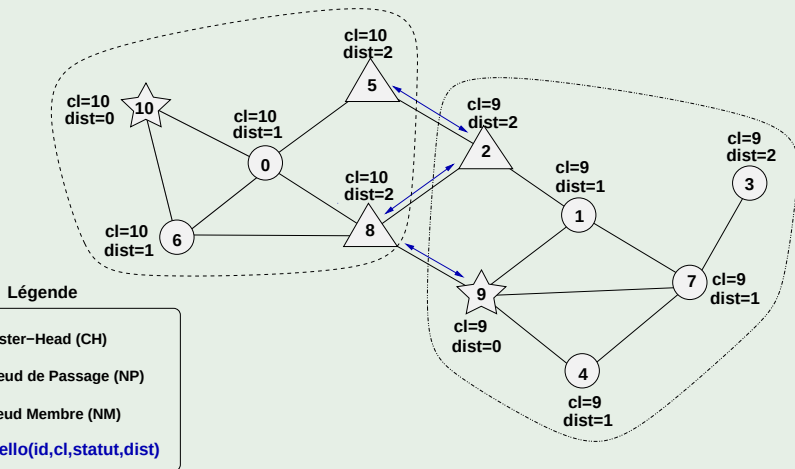
- ☆ Cluster-Head (CH)
- △ Noeud de Passage (NP)
- Noeud Membre (NM)
- Noeud quelconque

Illustration de construction des *clusters* ($k = 2$)



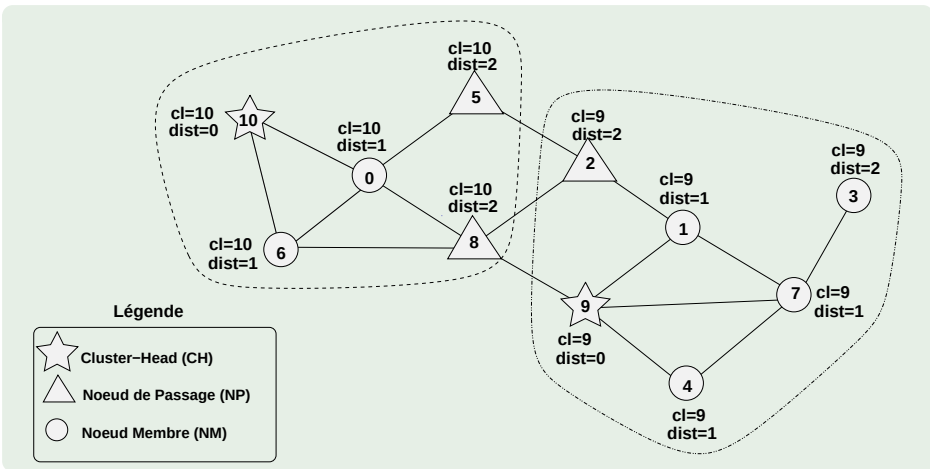
Validation de SDEAC : Preuve formelle - Simulation

Illustration de construction des *clusters* ($k = 2$)



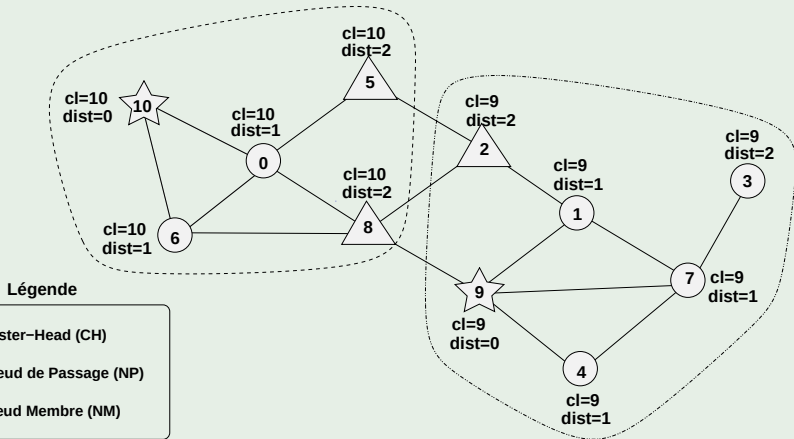
Validation de SDEAC : Preuve formelle - Simulation

Illustration de construction des *clusters* ($k = 2$)



Validation de SDEAC : Preuve formelle - Simulation

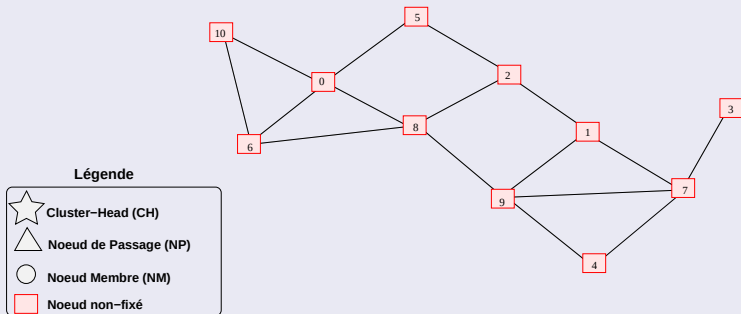
Illustration de construction des *clusters* ($k = 2$)



Validation de SDEAC : Preuve formelle - Simulation

Complexité en temps (1/2)

Illustration de la preuve ($k = 2$)

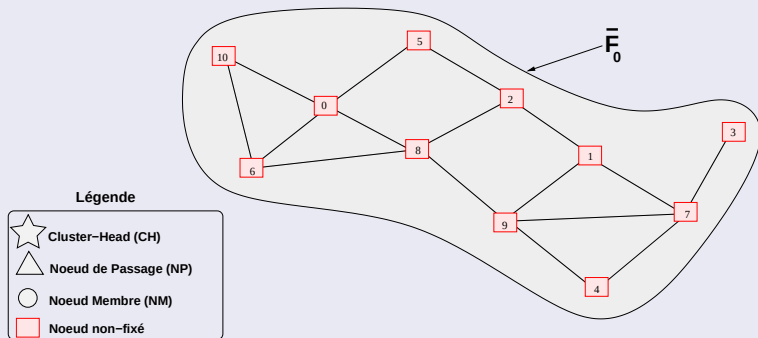


Hypothèse de récurrence

À la configuration γ_i , les nœuds à distance $i - 1$ se fixent.

Complexité en temps (1/2)

Illustration de la preuve ($k = 2$)

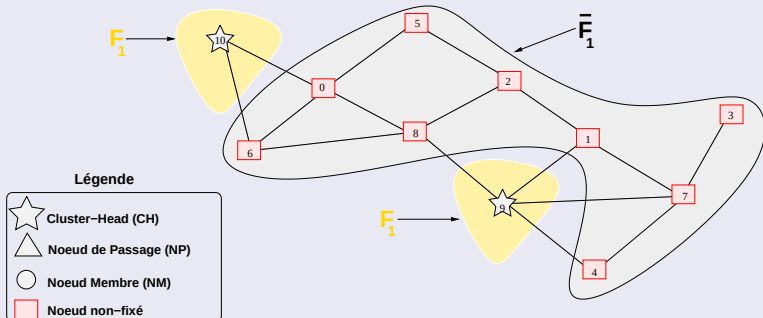


Hypothèse de récurrence

À la configuration γ_i , les nœuds à distance $i - 1$ se fixent.

Complexité en temps (1/2)

Illustration de la preuve ($k = 2$)

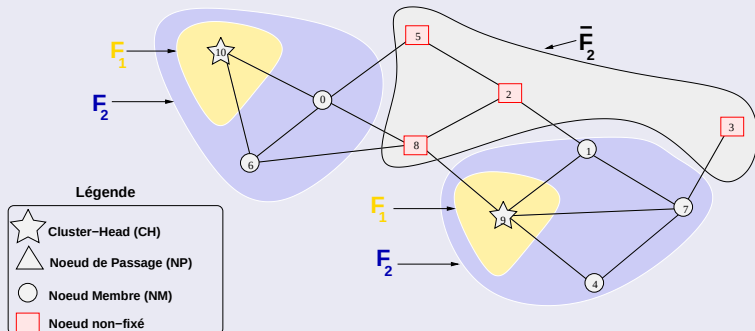


Hypothèse de récurrence

À la configuration γ_i , les nœuds à distance $i - 1$ se fixent.

Complexité en temps (1/2)

Illustration de la preuve ($k = 2$)

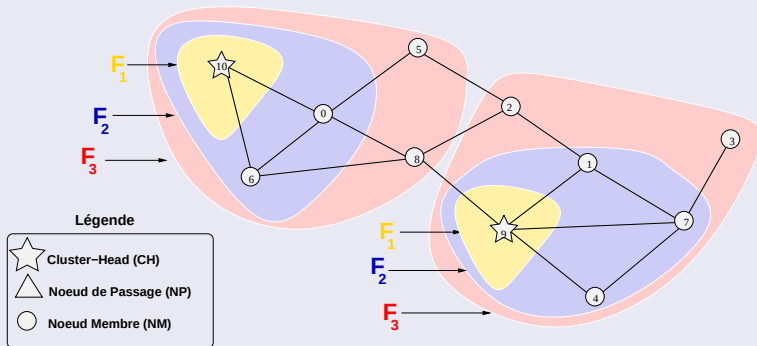


Hypothèse de récurrence

À la configuration γ_i , les nœuds à distance $i - 1$ se fixent.

Complexité en temps (1/2)

Illustration de la preuve ($k = 2$)

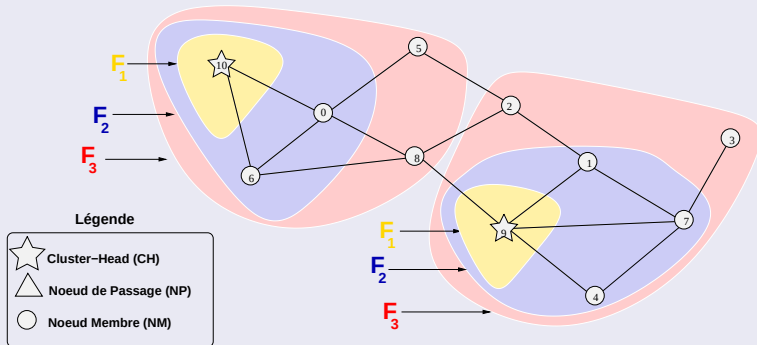


Hypothèse de récurrence

À la configuration γ_i , les nœuds à distance $i - 1$ se fixent.

Complexité en temps (1/2)

Illustration de la preuve ($k = 2$)



Hypothèse de récurrence

À la configuration γ_i , les nœuds à distance $i - 1$ se fixent.

Complexité en temps (2/2)

Théorème

À chaque transition i , le nombre de nœuds fixés croît strictement.

$$\Rightarrow \forall i, |F_{i+1}| > |F_i|$$

 *Idée de la preuve*

$$\Rightarrow |F_i| \mapsto n$$

$$\Rightarrow |\overline{F_i}| \mapsto 0$$

Pire des cas: la chaîne ordonnée

 *Le temps de stabilisation est d'au plus $n + 2$ transitions.*

Complexité en temps (2/2)

Théorème

À chaque transition i , le nombre de nœuds fixés croît strictement.

$$\Rightarrow \forall i, |F_{i+1}| > |F_i|$$

 *Idée de la preuve*

$$\Rightarrow |F_i| \mapsto n$$

$$\Rightarrow |\overline{F_i}| \mapsto 0$$

Pire des cas: la chaîne ordonnée

 *Le temps de stabilisation est d'au plus $n + 2$ transitions.*

Complexité en temps (2/2)

Théorème

À chaque transition i , le nombre de nœuds fixés croît strictement.

$$\Rightarrow \forall i, |F_{i+1}| > |F_i|$$

 *Idée de la preuve*

$$\Rightarrow |F_i| \mapsto n$$

$$\Rightarrow |\overline{F_i}| \mapsto 0$$

Pire des cas: la chaîne ordonnée

 *Le temps de stabilisation est d'au plus $n + 2$ transitions.*

Complexité en espace mémoire

➡ Occupation mémoire par nœud : $(\Delta_u + 1) \times \log(2n + k + 3)$ bits

👉 Idée de la preuve

➡ $\log(n)$ bits pour encoder une variable ayant n valeurs possibles

➡ 4 variables pour chaque nœud u

① $id_u \Rightarrow n$

② $cl_u \Rightarrow n$

③ $dist_{(u, CH_u)} \Rightarrow k$

④ $statut_u \Rightarrow 3$

$\Rightarrow$

• Espace mémoire pour chaque:

• Voisin : $\log(2n + k + 3)$

• Nœud: $(\Delta_u + 1) \times \log(2n + k + 3)$

• Avec: $\Delta_u = |N_u|$ degré de u

Graphe complet $\Rightarrow n \times \log(2n + k + 3)$ bits

Complexité en espace mémoire

➡ Occupation mémoire par nœud : $(\Delta_u + 1) \times \log(2n + k + 3)$ bits

👉 Idée de la preuve

➡ $\log(n)$ bits pour encoder une variable ayant n valeurs possibles

➡ 4 variables pour chaque nœud u

① $id_u \Rightarrow n$

② $cl_u \Rightarrow n$

③ $dist_{(u, CH_u)} \Rightarrow k$

④ $statut_u \Rightarrow 3$

$\Rightarrow$

• Espace mémoire pour chaque:

• Voisin : $\log(2n + k + 3)$

• Nœud: $(\Delta_u + 1) \times \log(2n + k + 3)$

• Avec: $\Delta_u = |N_u|$ degré de u

Graphe complet $\Rightarrow n \times \log(2n + k + 3)$ bits

Complexité en espace mémoire

➡ Occupation mémoire par nœud : $(\Delta_u + 1) \times \log(2n + k + 3)$ bits

👉 Idée de la preuve

➡ $\log(n)$ bits pour encoder une variable ayant n valeurs possibles

➡ 4 variables pour chaque nœud u

① $id_u \Rightarrow n$

② $cl_u \Rightarrow n$

③ $dist_{(u, CH_u)} \Rightarrow k$

④ $statut_u \Rightarrow 3$

$\Rightarrow$

• Espace mémoire pour chaque:

• Voisin : $\log(2n + k + 3)$

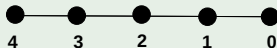
• Nœud: $(\Delta_u + 1) \times \log(2n + k + 3)$

• Avec: $\Delta_u = |N_u|$ degré de u

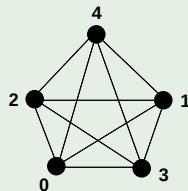
Graphe complet $\Rightarrow n \times \log(2n + k + 3)$ bits

Synthèse: temps stabilisation - occupation mémoire

	Temps de stabilisation	Occupation mémoire
Chaîne ordonnée	$n + 2$ transitions	$3 \times \log(2n + k + 3)$ bits
Graphe complet	2 transitions	$n \times \log(2n + k + 3)$ bits



(a) Chaîne ordonnée



(b) Graphe complet

Environnement et paramètres de simulation

Environnement de simulation

- ☞ Simulateur OMNeT++
- ☞ Librairie SNAP
- ☞ Grid'5000

Métriques d'évaluation

- ☞ Temps de stabilisation
 - ☞ Taille du réseau
 - ☞ Densité du réseau - degré des nœuds
 - ☞ Paramètre k
- ☞ Impacts de pannes transitoires (modifications topologiques)
 - ☞ Transitions supplémentaires
 - ☞ Nœuds impactés

Série de 100 simulations - Intervalle de confiance à 99%

Environnement et paramètres de simulation

Environnement de simulation

- ☞ Simulateur OMNeT++
- ☞ Librairie SNAP
- ☞ Grid'5000

Métriques d'évaluation

- ☞ Temps de stabilisation
 - ☞ Taille du réseau
 - ☞ Densité du réseau - degré des nœuds
 - ☞ Paramètre k
- ☞ Impacts de pannes transitoires (modifications topologiques)
 - ☞ Transitions supplémentaires
 - ☞ Nœuds impactés

Série de 100 simulations - Intervalle de confiance à 99%

Environnement et paramètres de simulation

Environnement de simulation

- ☞ Simulateur OMNeT++
- ☞ Librairie SNAP
- ☞ Grid'5000

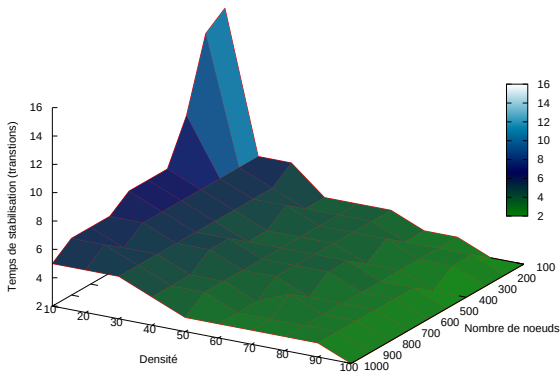
Métriques d'évaluation

- ☞ Temps de stabilisation
 - ☛ Taille du réseau
 - ☛ Densité du réseau - degré des nœuds
 - ☛ Paramètre k
- ☞ Impacts de pannes transitoires (modifications topologiques)
 - ☛ Transitions supplémentaires
 - ☛ Nœuds impactés

Série de 100 simulations - Intervalle de confiance à 99%

Évaluation du temps de stabilisation moyen

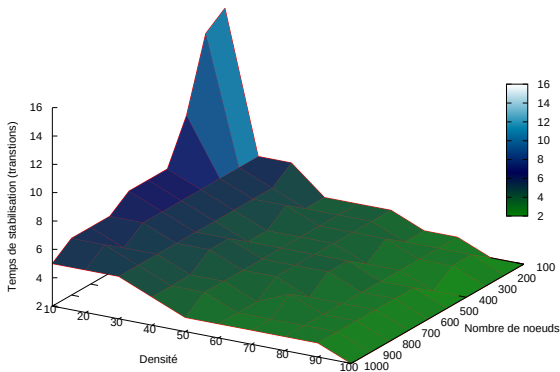
➡ En fonction de taille et de la densité du réseau



Temps de stabilisation moyen inférieur à celui du pire des cas

Évaluation du temps de stabilisation moyen

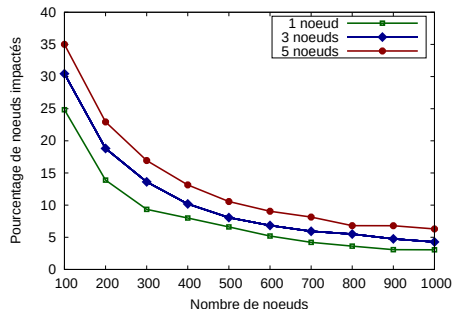
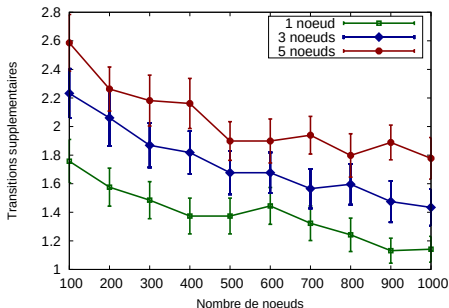
➡ En fonction de taille et de la densité du réseau



Temps de stabilisation moyen inférieur à celui du pire des cas

Impact de pannes transitoires (1/2)

👉 Réseaux de taille variable - Disparition de 1, 3 et 5 nœuds



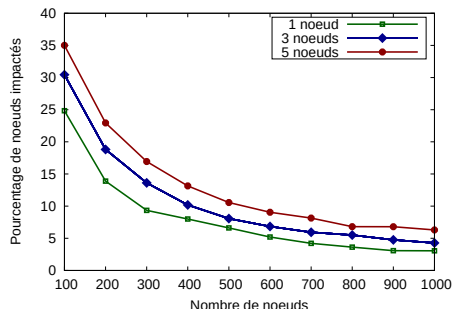
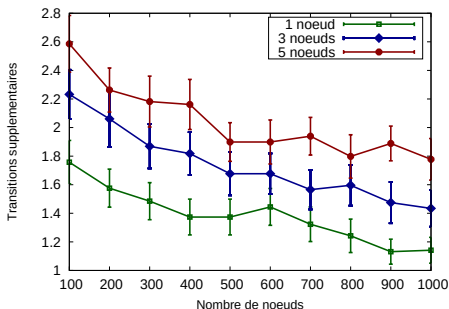
👉 Transitions supplémentaires

👉 Nombre de nœuds impactés

Impacts locaux des perturbations

Impact de pannes transitoires (1/2)

➡ Réseaux de taille variable - Disparition de 1, 3 et 5 nœuds



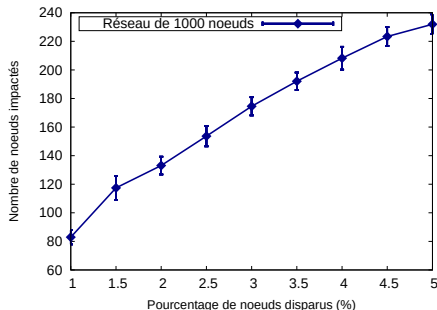
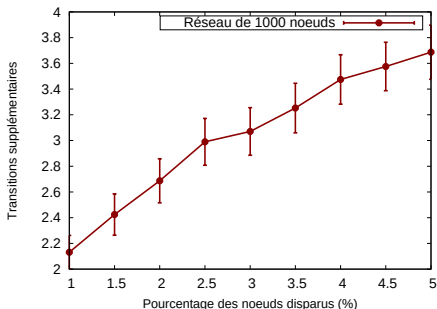
➡ Transitions supplémentaires

➡ Nombre de nœuds impactés

Impacts locaux des perturbations

Impact de pannes transitoires (2/2)

☞ Réseaux de 1000 nœuds - Disparition de 1% à 5% des nœuds



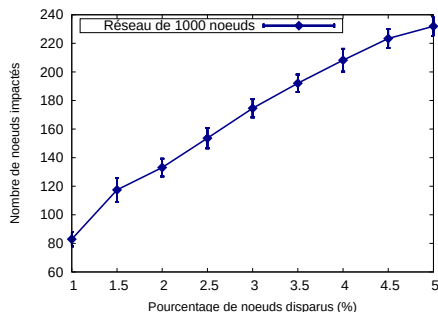
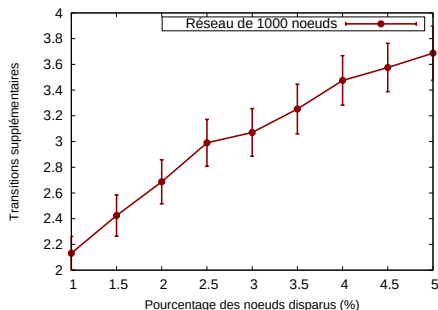
☞ Transitions supplémentaires

☞ Nombre de nœuds impactés

Environ 1/4 des nœuds du réseau sont impactés

Impact de pannes transitoires (2/2)

👉 Réseaux de 1000 nœuds - Disparition de 1% à 5% des nœuds



👉 Transitions supplémentaires

👉 Nombre de nœuds impactés

Environ 1/4 des nœuds du réseau sont impactés

Contributions

SDEAC : self-Stabilizing Distributed Energy-Aware Clustering

- ✎ Structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc
- ✎ Voisinage à distance 1 $\Rightarrow$ construction de clusters à k sauts
- ✎ Adaptation aux changements topologiques

Publications internationales avec actes et comité de sélection

- 1 KSI TIIS 2013 (revue)
- 2 ARIMA 2014 (revue)
- 3 ACM IMCOM 2013, **Best Paper Award** (conférence)

Publications francophones avec actes et comité de sélection

- 1 URED 2012 (revue)
- 2 CARI 2012 (conférence)
- 3 MajecSTIC 2012 (conférence)

Contributions

SDEAC : self-Stabilizing Distributed Energy-Aware Clustering

- ✎ Structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc
- ✎ Voisinage à distance 1 $\Rightarrow$ construction de clusters à k sauts
- ✎ Adaptation aux changements topologiques

Publications internationales avec actes et comité de sélection

- ❶ KSI TIIS 2013 (revue)
- ❷ ARIMA 2014 (revue)
- ❸ ACM IMCOM 2013, **Best Paper Award** (conférence)

Publications francophones avec actes et comité de sélection

- ❶ URED 2012 (revue)
- ❷ CARI 2012 (conférence)
- ❸ MajecSTIC 2012 (conférence)

Contributions

SDEAC : self-Stabilizing Distributed Energy-Aware Clustering

- ✎ Structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc
- ✎ Voisinage à distance 1 $\Rightarrow$ construction de clusters à k sauts
- ✎ Adaptation aux changements topologiques

Publications internationales avec actes et comité de sélection

- 1 KSI TIIS 2013 (revue)
- 2 ARIMA 2014 (revue)
- 3 ACM IMCOM 2013, **Best Paper Award** (conférence)

Publications francophones avec actes et comité de sélection

- 1 URED 2012 (revue)
- 2 CARI 2012 (conférence)
- 3 MajecSTIC 2012 (conférence)

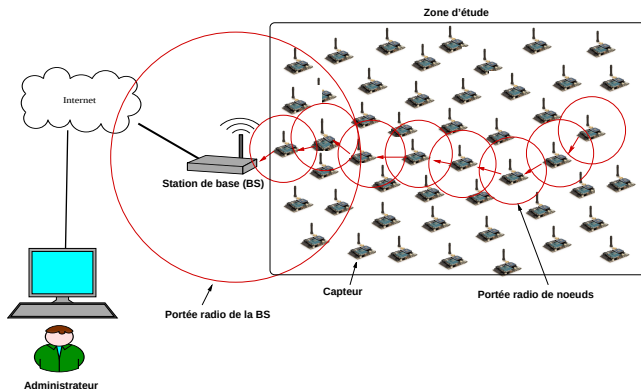
Sommaire

- 1 Contexte et Motivations
- 2 SDEAC : une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc
- 3 SDEAC dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil**
 - Présentation des RCSF
 - Étude de la consommation énergétique de SDEAC
 - Comparaison: SDEAC vs solution de Mitton et al.
 - Synthèse
- 4 Acheminement de l'information à l'aide de SDEAC
- 5 Conclusion et perspectives

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

RCSF

- ➡ Capteurs déployés en grand nombre
- ➡ Collecte de grandeurs physiques
- ➡ Collaboration pour l'acheminement de données



Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

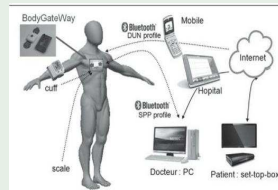
Applications de RCSF



Applications militaires



Surveillance des centrales nucléaires



Applications médicales

Contraintes des RCSF

- 1 Faibles ressources énergétiques
 - ☞ Traitements CPU, Opérations de captage, **Communications**
- 2 Vulnérables aux
 - ☞ Dysfonctionnements de composants, Modifications topologiques, ...

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

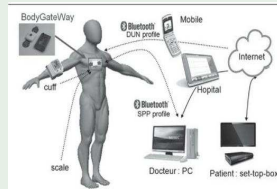
Applications de RCSF



Applications militaires



Surveillance des centrales nucléaires



Applications médicales

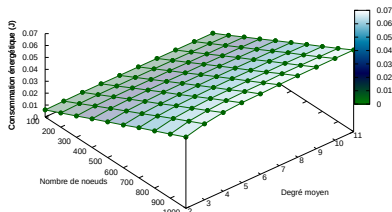
Contraintes des RCSF

- ❶ Faibles ressources énergétiques
 - ☞ Traitements CPU, Opérations de captage, **Communications**
- ❷ Vulnérables aux
 - ☞ Dysfonctionnements de composants, Modifications topologiques, ...

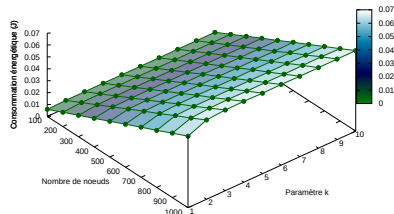
Évaluation de la consommation énergétique

Modèle énergétique de référence [Heinzelman *et al.*'2000]

☞ Prise en compte de la distance de transmission et taille du message



☞ En fonction du degré moyen



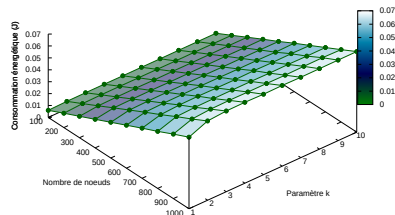
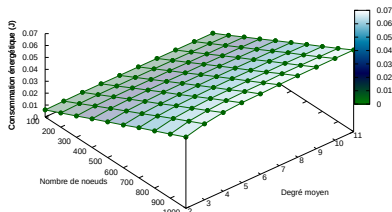
☞ En fonction du paramètre k

Passage à l'échelle

Évaluation de la consommation énergétique

Modèle énergétique de référence [Heinzelman *et al.*'2000]

➡ Prise en compte de la distance de transmission et taille du message



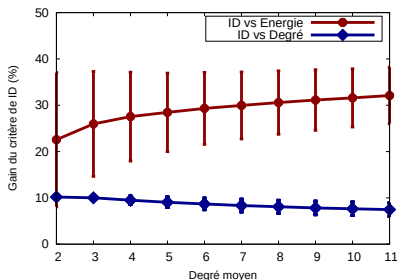
➡ En fonction du degré moyen

➡ En fonction du paramètre k

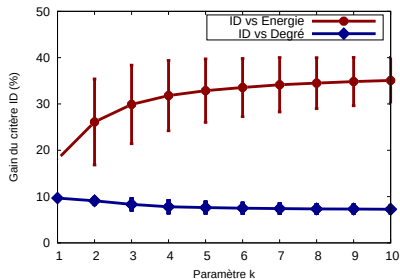
Passage à l'échelle

Généralisation du critère d'élection des *cluster-heads*

- 1 Identité maximale
- 2 Degré maximal
- 3 Énergie résiduelle



➡ En fonction du degré moyen

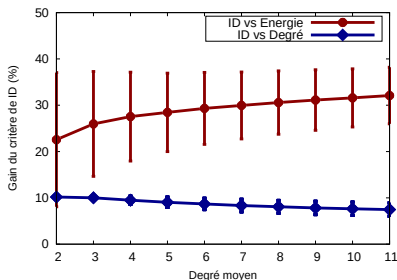


➡ En fonction du paramètre k

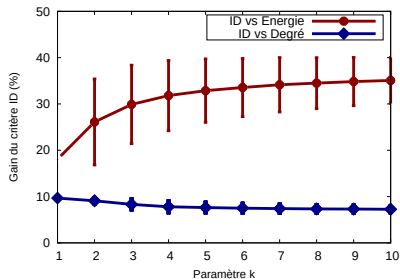
Identité maximale procure la meilleure stabilité lors du *clustering*

Généralisation du critère d'élection des *cluster-heads*

- 1 Identité maximale
- 2 Degré maximal
- 3 Énergie résiduelle



➡ En fonction du degré moyen

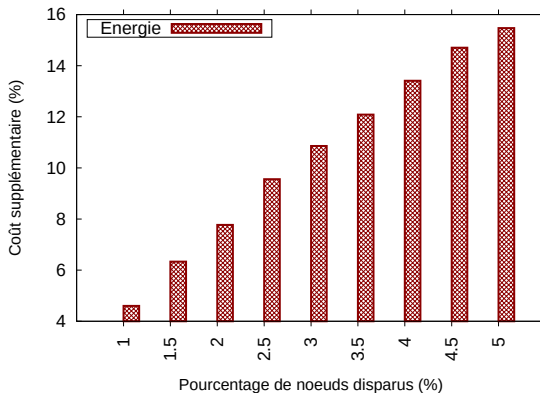


➡ En fonction du paramètre k

Identité maximale procure la meilleure stabilité lors du *clustering*

Tolérance aux pannes transitoires

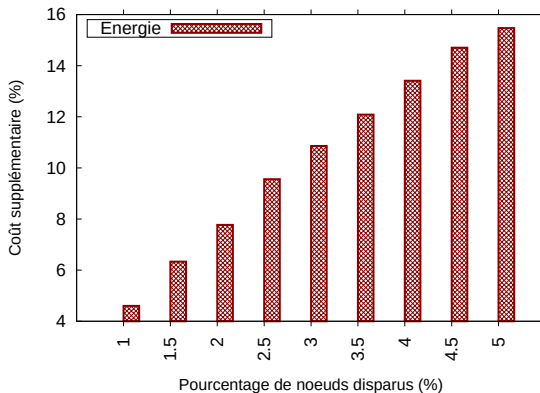
👉 Réseaux de 1000 nœuds - Disparition de 1% à 5% des nœuds



Efficacité énergétique de SDEAC

Tolérance aux pannes transitoires

👉 Réseaux de 1000 nœuds - Disparition de 1% à 5% des nœuds



Efficacité énergétique de SDEAC

Comparaison avec quelle solution

Solutions à k sauts fondées sur un modèle à passage de messages

- ☞ (x,k) -Clustering [Larson et Tsigas'2011]
 - Synchrones
 - Élection de x *cluster-heads* pour chaque nœud
- ☞ k -Density [Mitton et al.'2005]
 - Asynchrones
 - Élection de 1 *cluster-head* pour chaque nœud

Consommation énergétique de SDEAC et Mitton et al. selon:

- ☞ Les mêmes topologies réseaux utilisées par Mitton et al.
 - topologies quelconques suivant une loi de Poisson
- ☞ Le modèle énergétique de référence de Heinzelman et al.

Comparaison avec quelle solution

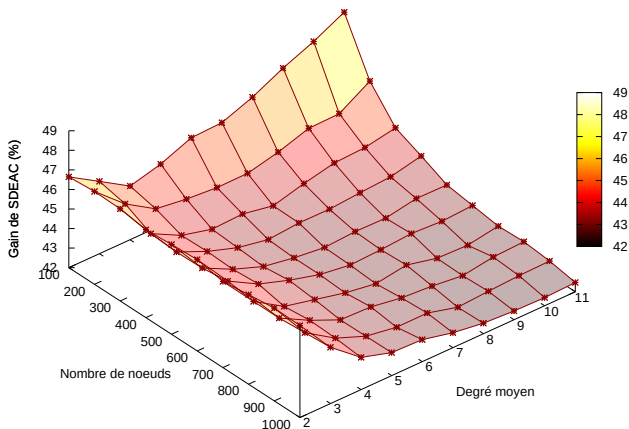
Solutions à k sauts fondées sur un modèle à passage de messages

- ➡ (x,k) -Clustering [Larson et Tsigas'2011]
 - Synchrones
 - Élection de x *cluster-heads* pour chaque nœud
- ➡ k -Density [Mitton et al.'2005]
 - Asynchrones
 - Élection de 1 *cluster-head* pour chaque nœud

Consommation énergétique de SDEAC et Mitton et al. selon:

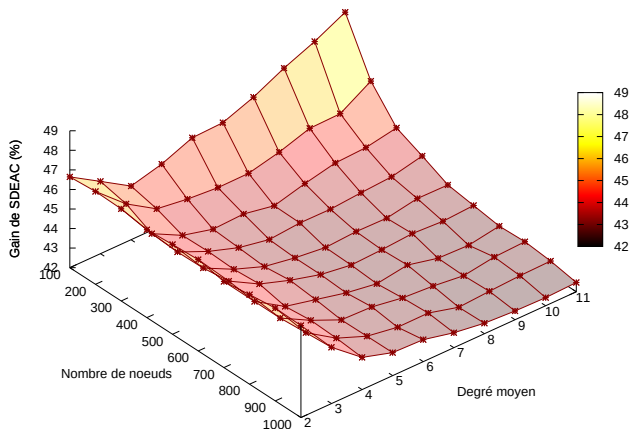
- ➡ Les mêmes topologies réseaux utilisées par Mitton et al.
 - topologies quelconques suivant une loi de Poisson
- ➡ Le modèle énergétique de référence de Heinzelman et al.

SDEAC vs Mitton et al.



SDEAC réduit la consommation énergétique entre 42% et 49%

SDEAC vs Mitton et al.

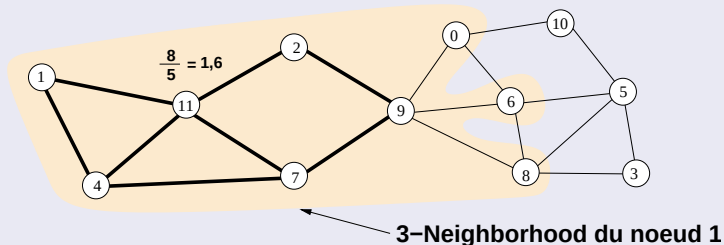


SDEAC réduit la consommation énergétique entre 42% et 49%

Réduction des communications de SDEAC

➡ Critère d'élection dans la solution de Mitton et al.: ***k-density***

Mitton et al.: exemple de calcul de la 2-density



Solution de Mitton et al.

Voisinage à distance $k + 1$ sauts

➡ Coûteux en messages

SDEAC

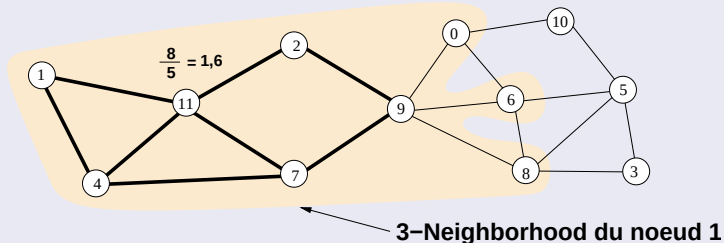
Voisinage à distance 1

➡ Réduit les messages

Réduction des communications de SDEAC

➡ Critère d'élection dans la solution de Mitton et al.: ***k-density***

Mitton et al.: exemple de calcul de la 2-density



Solution de Mitton et al.

Voisinage à distance $k + 1$ sauts

➡ Coûteux en messages

SDEAC

Voisinage à distance 1

➡ Réduit les messages

Contributions

Étude de la consommation énergétique SDEAC dans les RCSF

- ➡ Trois critères d'élection des *cluster-heads* (ID, Degré, Énergie)
- ➡ Passage à l'échelle des trois critères
- ➡ ID procure une meilleure stabilité lors de la phase de *clustering*
- ➡ Adaptation aux changements topologiques
- ➡ Réduction énergétique de 42% à 49% comparé à Mitton et *al.*

Publications internationales avec actes et comité de sélection

- 1 IJANS 2013 (revue)
- 2 CTRQ 2013, **Best Paper Award** (conférence)
- 3 ICAS 2013, (conférence)

Publications francophones avec actes et comité de sélection

- 1 CNRIA 2013, (conférence)

Contributions

Étude de la consommation énergétique SDEAC dans les RCSF

- ➡ Trois critères d'élection des *cluster-heads* (ID, Degré, Énergie)
- ➡ Passage à l'échelle des trois critères
- ➡ ID procure une meilleure stabilité lors de la phase de *clustering*
- ➡ Adaptation aux changements topologiques
- ➡ Réduction énergétique de 42% à 49% comparé à Mitton et *al.*

Publications internationales avec actes et comité de sélection

- 1 IJANS 2013 (revue)
- 2 CTRQ 2013, **Best Paper Award** (conférence)
- 3 ICAS 2013, (conférence)

Publications francophones avec actes et comité de sélection

- 1 CNRIA 2013, (conférence)

Contributions

Étude de la consommation énergétique SDEAC dans les RCSF

- ➡ Trois critères d'élection des *cluster-heads* (ID, Degré, Énergie)
- ➡ Passage à l'échelle des trois critères
- ➡ ID procure une meilleure stabilité lors de la phase de *clustering*
- ➡ Adaptation aux changements topologiques
- ➡ Réduction énergétique de 42% à 49% comparé à Mitton et *al.*

Publications internationales avec actes et comité de sélection

- 1 IJANS 2013 (revue)
- 2 CTRQ 2013, **Best Paper Award** (conférence)
- 3 ICAS 2013, (conférence)

Publications francophones avec actes et comité de sélection

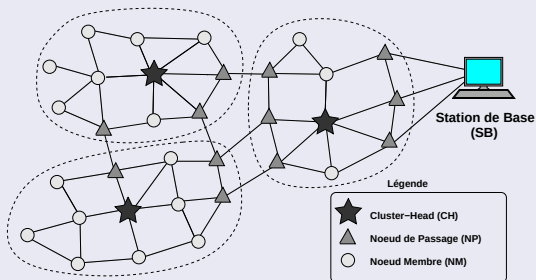
- 1 CNRIA 2013, (conférence)

Sommaire

- 1 Contexte et Motivations
- 2 SDEAC : une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc
- 3 SDEAC dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil
- 4 Acheminement de l'information à l'aide de SDEAC**
 - Cas d'utilisation proposés
 - Mesures de performance
 - Synthèse
- 5 Conclusion et perspectives

Utilisations de l'infrastructure de SDEAC

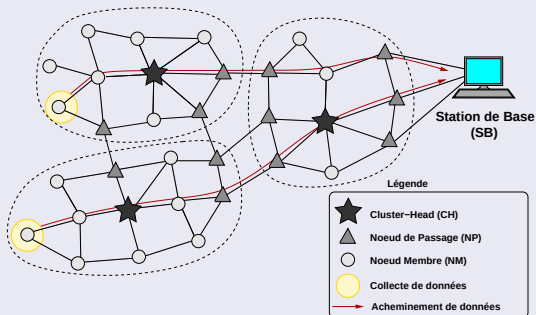
➡ Acheminer l'information collectée dans le réseau jusqu'à la BS



- 1 Routage Sans Agrégation (RSA)
- 2 Routage avec Agrégation Partielle (RAP)
- 3 Routage avec Agrégation Totale (RAT)

Utilisations de l'infrastructure de SDEAC

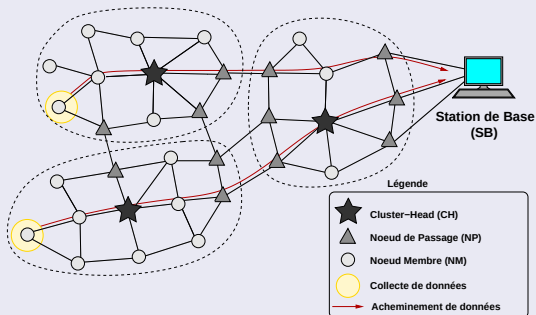
➡ Acheminer l'information collectée dans le réseau jusqu'à la BS



- 1 Routage Sans Agrégation (RSA)
- 2 Routage avec Agrégation Partielle (RAP)
- 3 Routage avec Agrégation Totale (RAT)

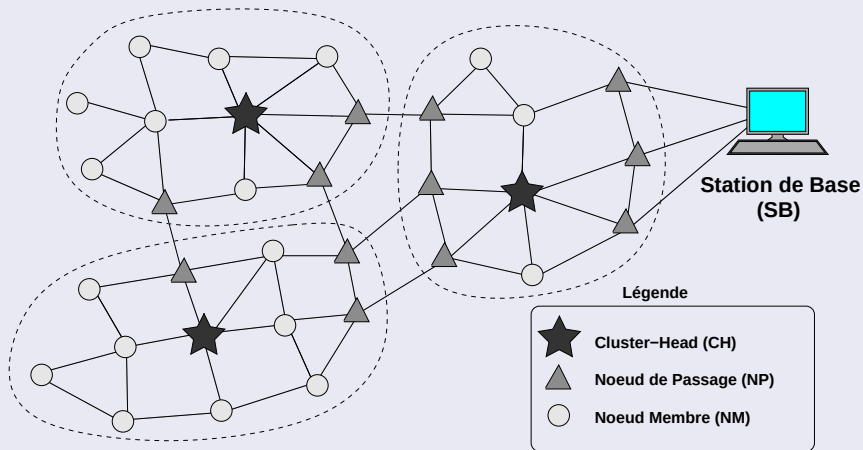
Utilisations de l'infrastructure de SDEAC

➡ Acheminer l'information collectée dans le réseau jusqu'à la BS

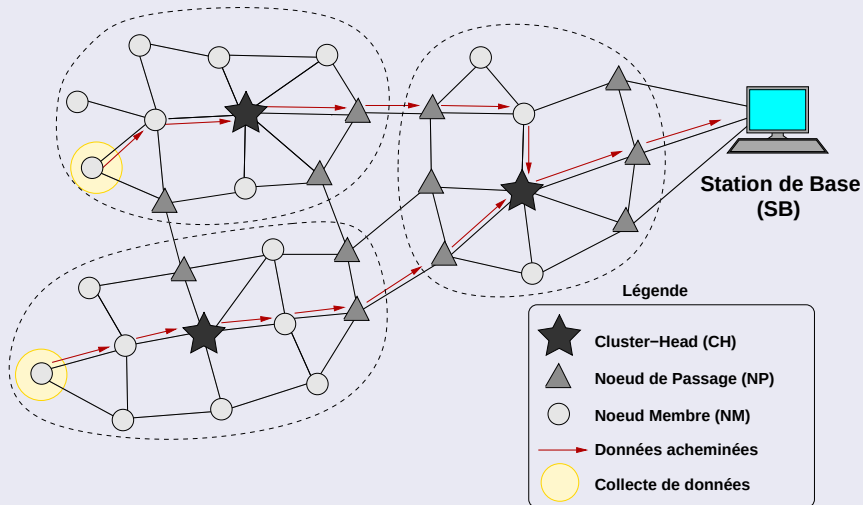


- 1 Routage Sans Agrégation (RSA)
- 2 Routage avec Agrégation Partielle (RAP)
- 3 Routage avec Agrégation Totale (RAT)

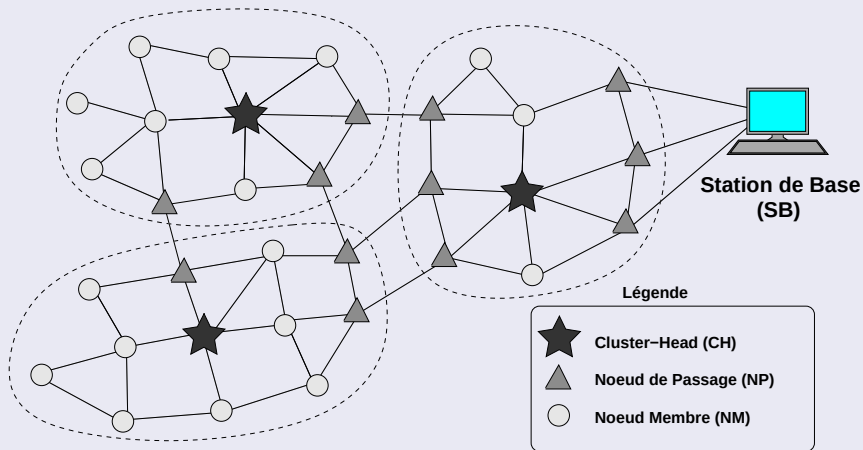
Routage Sans Agrégation (RSA)



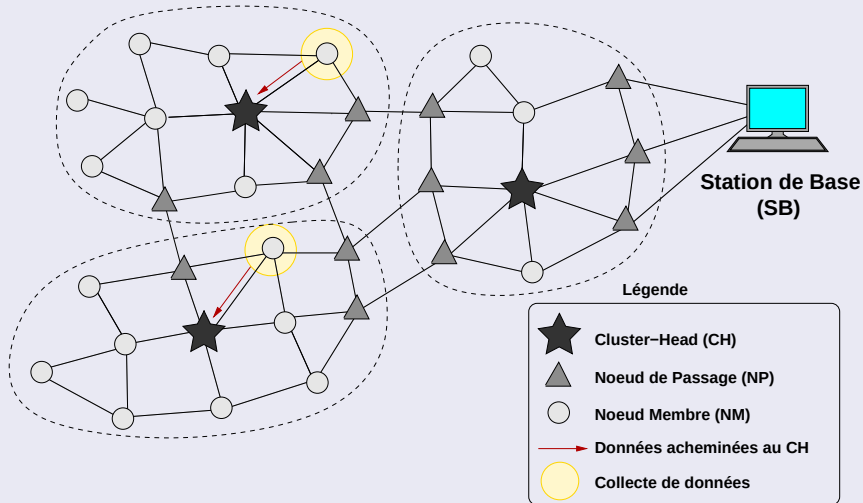
Routage Sans Agrégation (RSA)



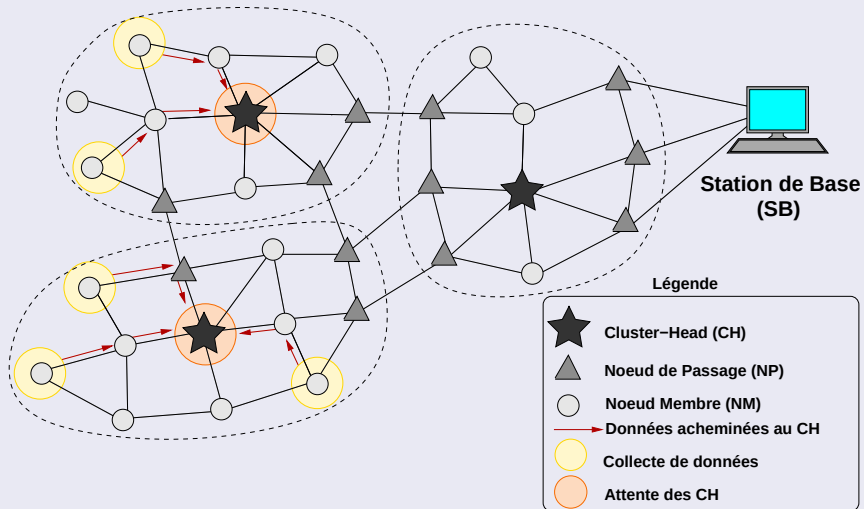
Routage avec Agrégation Partielle (RAP)



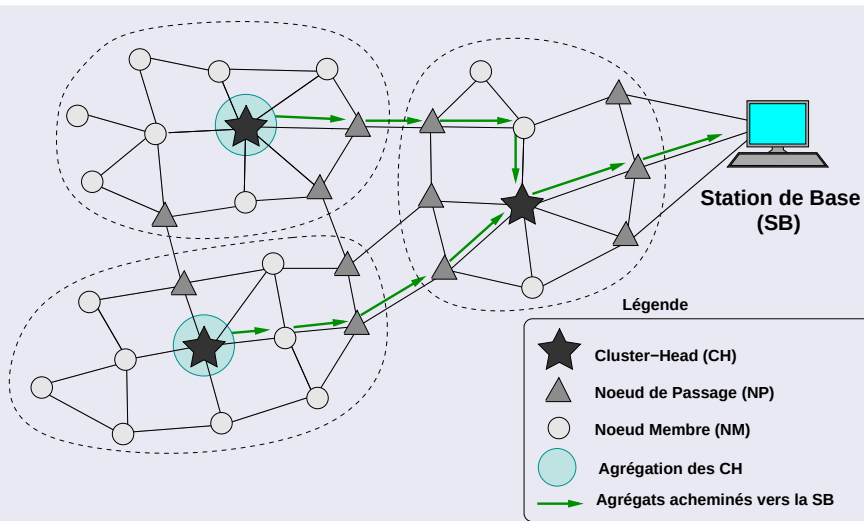
Routage avec Agrégation Partielle (RAP)



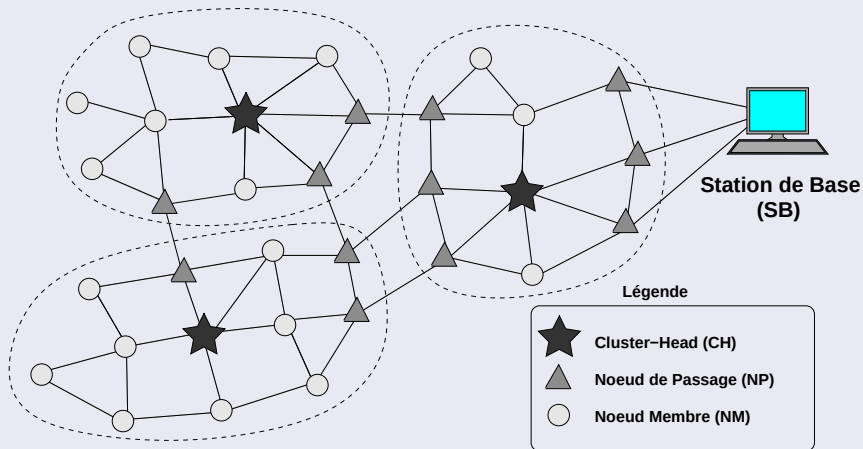
Routage avec Agrégation Partielle (RAP)



Routage avec Agrégation Partielle (RAP)

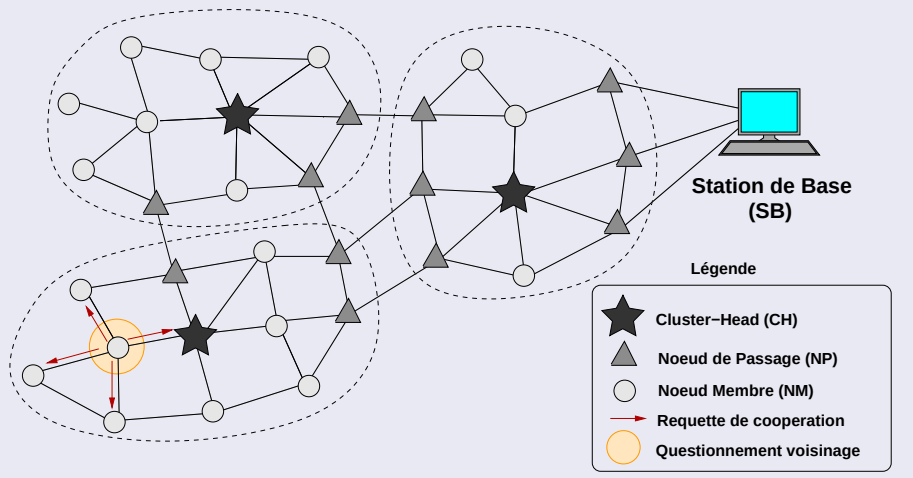


Routage avec Agrégation Totale (RAT)ⁱ

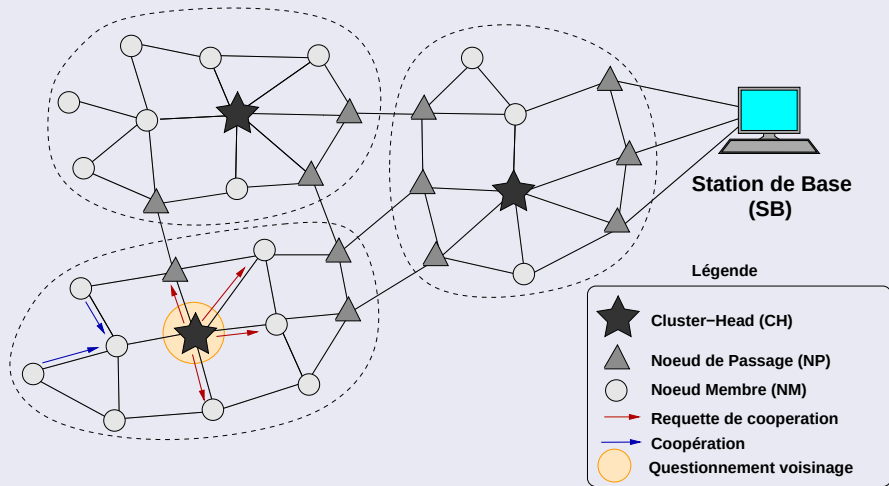


ⁱ Agrégation de données à base de Système Multi-Agents (SMA) coopératifs. Université de Technologie de Troyes (UTT)

Routage avec Agrégation Totale (RAT)ⁱ

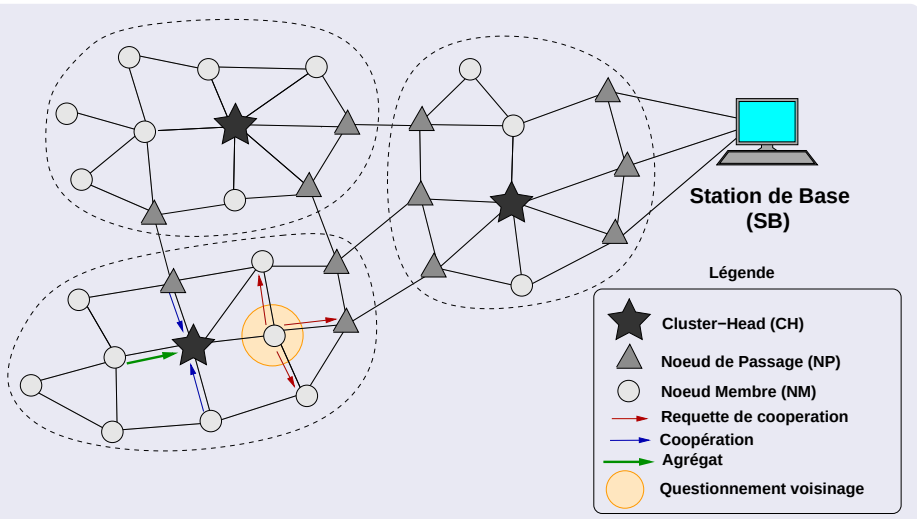


Routage avec Agrégation Totale (RAT) ⁱ



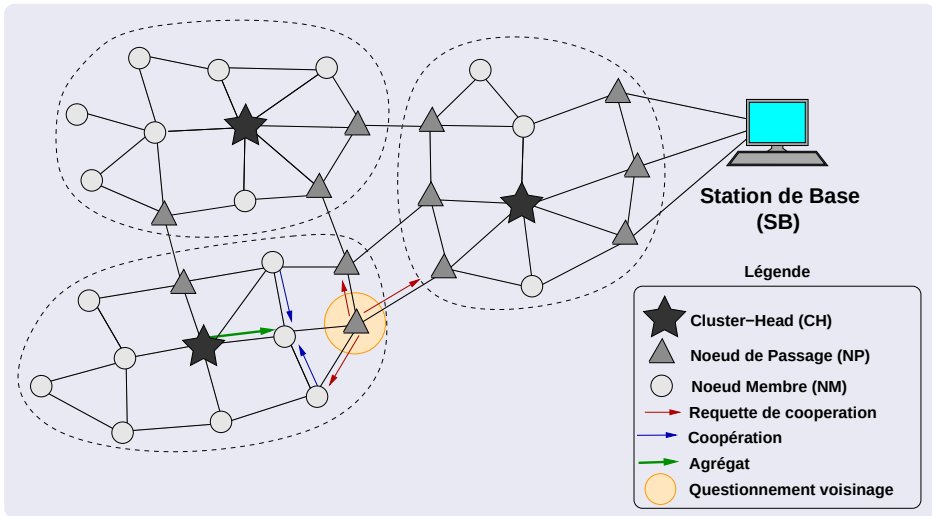
ⁱ Agrégation de données à base de Système Multi-Agents (SMA) coopératifs. **Université de Technologie de Troyes (UTT)**

Routage avec Agrégation Totale (RAT)ⁱ



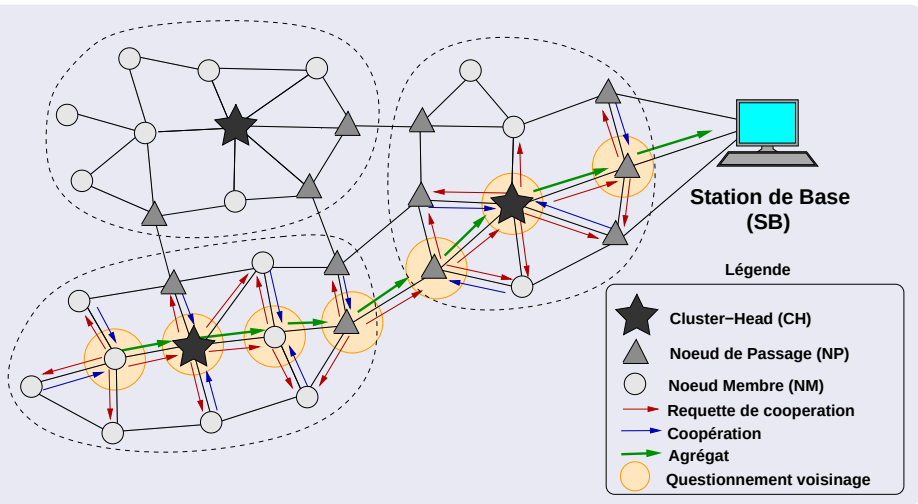
ⁱ Agrégation de données à base de Système Multi-Agents (SMA) coopératifs. Université de Technologie de Troyes (UTT)

Routage avec Agrégation Totale (RAT) ⁱ



ⁱ Agrégation de données à base de Système Multi-Agents (SMA) coopératifs. **Université de Technologie de Troyes (UTT)**

Routage avec Agrégation Totale (RAT) ⁱ



ⁱ Agrégation de données à base de Système Multi-Agents (SMA) coopératifs. **Université de Technologie de Troyes (UTT)**

Environnement et paramètres de simulation

Métriques d'évaluation

- 1 Délai de bout en bout
- 2 Consommation énergétique totale
- 3 Durée de vie du réseau

Série de 100 simulations - Intervalle de confiance à 99%

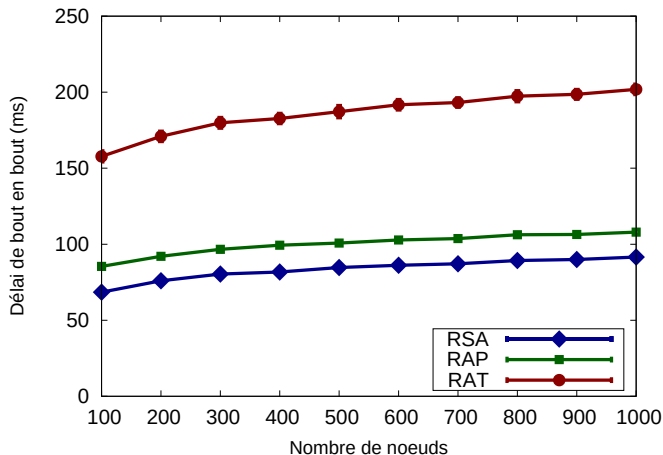
Environnement et paramètres de simulation

Métriques d'évaluation

- 1 Délai de bout en bout
- 2 Consommation énergétique totale
- 3 Durée de vie du réseau

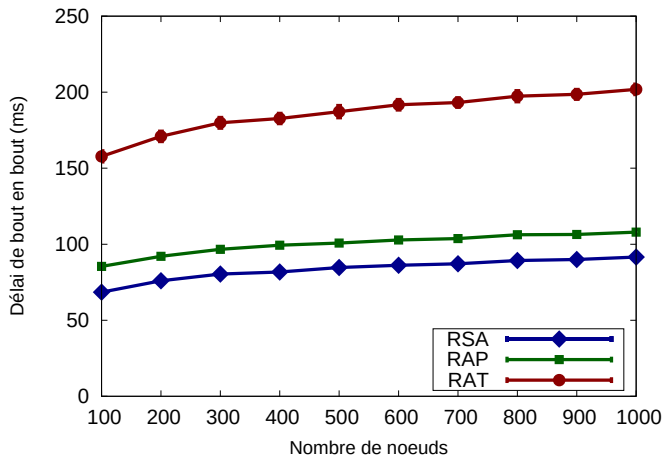
Série de 100 simulations - Intervalle de confiance à 99%

RSA, RAP et RAT: délai de bout en bout



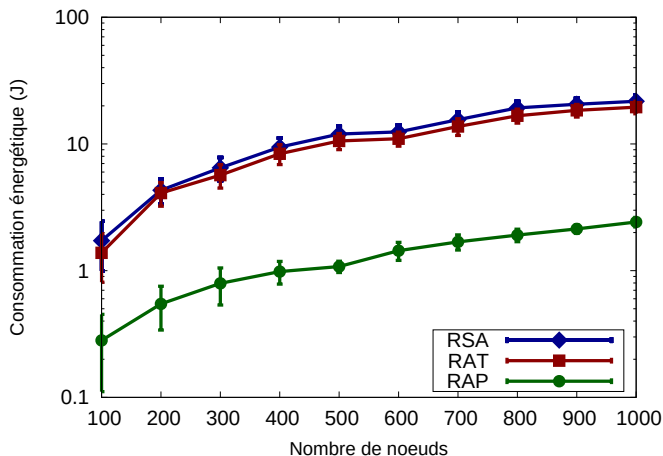
Le RSA minimise le délai de bout en bout

RSA, RAP et RAT: délai de bout en bout



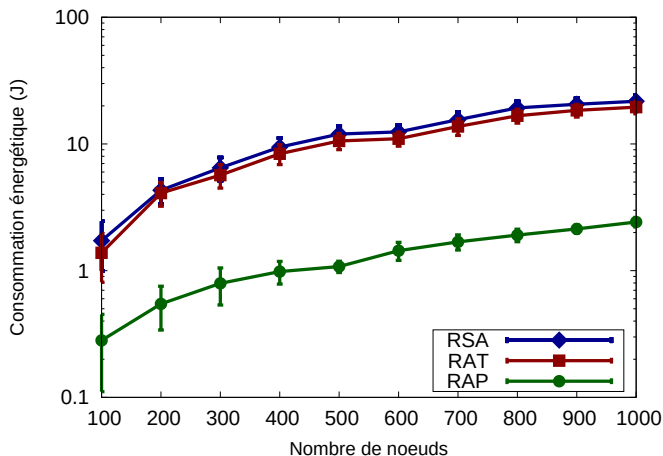
Le RSA minimise le délai de bout en bout

RSA, RAP et RAT: consommation énergétique totale



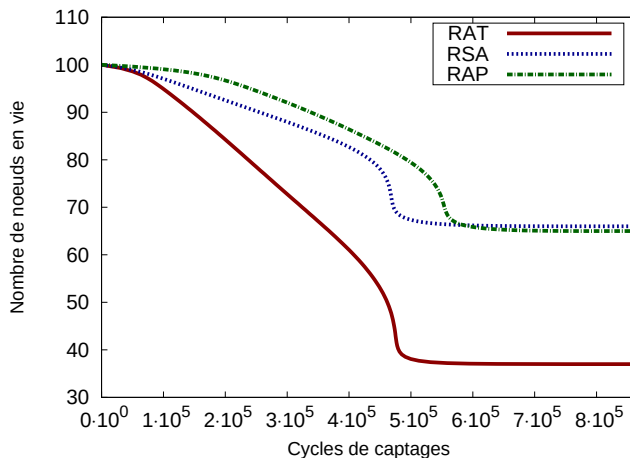
Le RAP réduit la consommation énergétique totale

RSA, RAP et RAT: consommation énergétique totale



Le RAP réduit la consommation énergétique totale

RSA, RAP et RAT: durée de vie



Le RAP prolonge la durée de vie du réseau

Contributions

Cas d'utilisation des *clusters* pour l'acheminement de l'information

- ➊ Routage Sans Agrégation (RSA)
 - ☞ Minimise le délai de bout en bout
- ➋ Routage avec Agrégation Partielle (RAP)
 - ☞ Réduit les communications et prolonge la durée de vie du réseau
- ➌ Routage avec Agrégation Totale (RAT)
 - ☞ Engendre un important trafic à cause des messages de coopération

Publications internationales avec actes et comité de sélection

- ➊ CTRQ 2014, (conférence)

Contributions

Cas d'utilisation des *clusters* pour l'acheminement de l'information

- ➊ Routage Sans Agrégation (RSA)
 - ☞ Minimise le délai de bout en bout
- ➋ Routage avec Agrégation Partielle (RAP)
 - ☞ Réduit les communications et prolonge la durée de vie du réseau
- ➌ Routage avec Agrégation Totale (RAT)
 - ☞ Engendre un important trafic à cause des messages de coopération

Publications internationales avec actes et comité de sélection

- ➊ CTRQ 2014, (conférence)

Sommaire

- 1 Contexte et Motivations
- 2 SDEAC : une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc
- 3 SDEAC dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil
- 4 Acheminement de l'information à l'aide de SDEAC
- 5 Conclusion et perspectives**

Conclusion (1/2)

SDEAC : self-Stabilizing Distributed Energy-Aware Clustering

- ✚ Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*
- ✚ Réduire les communications et tolérer les pannes transitoires
- ✚ Voisinage à distance 1 $\Rightarrow$ construction de *clusters* à k sauts

Preuve formelle de la correction de SDEAC

- ✚ Temps de stabilisation est d'au plus $n + 2$ transitions
- ✚ Occupation mémoire: $(\Delta_u + 1) \times \log(2n + k + 3)$ bits par nœud

Évaluation de performances moyennes par simulation sous OMNeT++

- ✚ Temps de stabilisation très inférieurs au pire des cas
- ✚ Passage à l'échelle
- ✚ Adaptation aux changements topologiques

Conclusion (1/2)

SDEAC : self-Stabilizing Distributed Energy-Aware Clustering

- ➡ Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*
- ➡ Réduire les communications et tolérer les pannes transitoires
- ➡ Voisinage à distance 1 $\Rightarrow$ construction de *clusters* à k sauts

Preuve formelle de la correction de SDEAC

- ➡ Temps de stabilisation est d'au plus $n + 2$ transitions
- ➡ Occupation mémoire: $(\Delta_u + 1) \times \log(2n + k + 3)$ bits par nœud

Évaluation de performances moyennes par simulation sous OMNeT++

- ➡ Temps de stabilisation très inférieurs au pire des cas
- ➡ Passage à l'échelle
- ➡ Adaptation aux changements topologiques

Conclusion (1/2)

SDEAC : self-Stabilizing Distributed Energy-Aware Clustering

- ✚ Structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc*
- ✚ Réduire les communications et tolérer les pannes transitoires
- ✚ Voisinage à distance 1 $\Rightarrow$ construction de *clusters* à k sauts

Preuve formelle de la correction de SDEAC

- ✚ Temps de stabilisation est d'au plus $n + 2$ transitions
- ✚ Occupation mémoire: $(\Delta_u + 1) \times \log(2n + k + 3)$ bits par nœud

Évaluation de performances moyennes par simulation sous OMNeT++

- ✚ Temps de stabilisation très inférieurs au pire des cas
- ✚ Passage à l'échelle
- ✚ Adaptation aux changements topologiques

Conclusion (2/2)

Étude de la consommation énergétique SDEAC dans les RCSF

- ➡ Passage à l'échelle des trois critères d'élection des *cluster-heads*
- ➡ Adaptation aux changements topologiques
- ➡ Réduction énergétique de 42% à 49% comparée à Mitton et *al.*

Deux solutions efficaces pour l'acheminement de l'information dans les RCSF

- 1 Routage Sans Agrégation (RSA)
 - ➡ Minimise les délais de bout en bout
- 2 Routage avec Agrégation Partielle (RAP)
 - ➡ Réduit les communications et prolonge la durée de vie du réseau

Conclusion (2/2)

Étude de la consommation énergétique SDEAC dans les RCSF

- ➡ Passage à l'échelle des trois critères d'élection des *cluster-heads*
- ➡ Adaptation aux changements topologiques
- ➡ Réduction énergétique de 42% à 49% comparée à Mitton et *al.*

Deux solutions efficaces pour l'acheminement de l'information dans les RCSF

- 1 Routage Sans Agrégation (RSA)
 - ➡ Minimise les délais de bout en bout
- 2 Routage avec Agrégation Partielle (RAP)
 - ➡ Réduit les communications et prolonge la durée de vie du réseau

Perspectives

Vers une meilleure stabilité des *clusters*

- ➡ Redondance des *cluster-heads*

Vers une combinaison de critères d'élection de *cluster-heads*

$$\mathcal{U}_u = w_1 \times E_u^r + w_2 \times \Delta_u$$

- ➡ Identité comme critère discriminatoire

Vers une structuration en arbre de *clusters*

- ➡ Construction d'arbre couvrant

Étude de cas de SDEAC dans une plateforme de réseaux de capteurs

- ➡ SensLab
- ➡ CapSec

Perspectives

Vers une meilleure stabilité des *clusters*

- ➡ Redondance des *cluster-heads*

Vers une combinaison de critères d'élection de *cluster-heads*

$$\mathcal{U}_u = w_1 \times E'_u + w_2 \times \Delta_u$$

- ➡ Identité comme critère discriminatoire

Vers une structuration en arbre de *clusters*

- ➡ Construction d'arbre couvrant

Étude de cas de SDEAC dans une plateforme de réseaux de capteurs

- ➡ SensLab
- ➡ CapSec

Perspectives

Vers une meilleure stabilité des *clusters*

- ➡ Redondance des *cluster-heads*

Vers une combinaison de critères d'élection de *cluster-heads*

$$\mathcal{U}_u = w_1 \times E'_u + w_2 \times \Delta_u$$

- ➡ Identité comme critère discriminatoire

Vers une structuration en arbre de *clusters*

- ➡ Construction d'arbre couvrant

Étude de cas de SDEAC dans une plateforme de réseaux de capteurs

- ➡ SensLab
- ➡ CapSec

Perspectives

Vers une meilleure stabilité des *clusters*

- ➡ Redondance des *cluster-heads*

Vers une combinaison de critères d'élection de *cluster-heads*

$$\mathcal{U}_u = w_1 \times E_u^r + w_2 \times \Delta_u$$

- ➡ Identité comme critère discriminatoire

Vers une structuration en arbre de *clusters*

- ➡ Construction d'arbre couvrant

Étude de cas de SDEAC dans une plateforme de réseaux de capteurs

- ➡ SensLab
- ➡ CapSec

Vers une structuration auto-stabilisante des réseaux *ad hoc* : cas des réseaux de capteurs sans fil

Mandicou BA

mandicou.ba@univ-reims.fr

Soutenance de thèse

Laboratoire CReSTIC - Équipe SysCom

Mercredi 21 mai 2014

