Simulation LEACH vs LEACH-C pour Réseaux Dynamiques avec Mobilité de Nœuds

Agriculture de Précision Suivi en Temps Réel de Bovins

Projet de Recherche en Réseaux de Capteurs Sans Fil (WSN)

Auteurs : Paul Roost et Alexis Bruneteau

3 Novembre 2025

Table des matières

1 Introduction & Contexte

1.1 Motivation

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) pour l'agriculture de précision nécessitent une gestion énergétique optimale. Le suivi de bétail mobile crée des défis uniques : clusters instables, communications longue portée, et batterie limitée.

Ce projet simule deux protocoles de clustering pour évaluer leur performance en réseaux dynamiques avec nœuds mobiles.

1.2 Protocoles LEACH et LEACH-C

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) : protocole décentralisé où chaque nœud a probabilité p de devenir cluster head chaque round.

LEACH-C : variante centralisée où la station de base sélectionne les cluster heads optimaux basés sur l'énergie disponible.

1.3 Approche de Simulation

Ce projet implémente deux approches SimPy complémentaires :

1. **Simulateur Léger** : wrapper simple autour des protocoles existants (120 lignes)
2. **Simulateur Hybride** : architecture complète orientée événements discrets (230 lignes)

Les deux approches génèrent résultats identiques. La première priorite la compatibilité, la seconde la pureté événementielle.

2 Méthodologie

2.1 Configuration du Réseau

- Champ : 100m × 100m
- Station de base : (0, −100)
- Nœuds : 100 à 200
- Énergie initiale : 0.5J

2.2 Modèle de Mobilité

Chaque round, chaque nœud se déplace aléatoirement :

- Direction : ϑ Uniform[0, 2π]
- Distance : d Uniform[0, 5m]
- Nouvelle position : (x + d · cos(ϑ), y + d · sin(ϑ))
- Limites : rester dans [0, 100] × [0, 100]

2.3 Modèle Énergétique

Transmission (2 modes) :

$$E_{\mathrm{Tx}(l,d)} = \begin{cases} E_{\mathrm{elec}} \cdot l + E_{\mathrm{fs}} \cdot l \cdot d^2 & d \leq d_0 \\ E_{\mathrm{elec}} \cdot l + E_{\mathrm{mp}} \cdot l \cdot d^4 & d > d_0 \end{cases}$$

Paramètres :

- E_elec = 50 nJ/bit
- E_fs = 10 pJ/bit/m²
- E_mp = 0.0013 pJ/bit/m⁴
- d_0 ≈ 87.7m

Réception : E_rx = E_elec · l = 50 nJ/bit Agrégation : E_agg = 5 nJ/bit

2.4 SimPy Event-Driven Model

Les deux simulateurs utilisent SimPy pour la gestion d'événements discrets :

```
class Simulator:
    def __init__(self):
        self.env = simpy.Environment()

    def run(self):
        self.env.process(self._round_process())
        self.env.run()

    def _round_process(self):
        while self.round_num < self.max_rounds:
            yield self.env.timeout(1.0)
            # Election, communication, mobility
```

Avantages : Modèle d'événements clair, gestion du temps, logging complet, testable.

2.5 Métriques Implémentées

10 métriques calculées par round :

1. Nombre de nœuds vivants
2. Paquets vers cluster heads
3. Paquets vers station de base

4. Énergie résiduelle moyenne
5. Nombre de rounds muets (0 CH)
6. Premier round muet (FMR)
7. Premier nœud mort (FDN)
8. Dernier nœud mort
9. DLBI (équilibre de charge)
10. RSPI (résilience)

Formules pour DLBI et RSPI :

$$\mathrm{DLBI}_r = 1 - \frac{\sum_j \left(L_{j,r} - |(L)_r\right)^2}{m_r \times |(L)_r^2}$$

$$\mathrm{RSPI} = \frac{2 \times \left[\left(1 - \frac{\mathrm{FR}_{\mathrm{muted}}}{\mathrm{R}_{\mathrm{max}}}\right) \times \left(1 - \frac{\mathrm{LR}_{\mathrm{dead}}}{\mathrm{R}_{\mathrm{max}}}\right)\right]}{\left(1 - \frac{\mathrm{FR}_{\mathrm{muted}}}{\mathrm{R}_{\mathrm{max}}}\right) + \left(1 - \frac{\mathrm{LR}_{\mathrm{dead}}}{\mathrm{R}_{\mathrm{max}}}\right)}$$

3 Résultats Expérimentaux

3.1 Scénarios

Scénario	Paquets	Activité	Nœuds
1	2000b	p=0.05	100
2	2000b	p=0.50	100
3	2000b	p=0.95	100
4	4000b	p=0.05	100
5	4000b	p=0.05	200
6	4000b	p=0.10	200

3.2 Résultats Clés par Scénario

3.2.1 Scénario 1 (Charge Faible)

Métrique	LEACH	LEACH-C
FDN	45	259
FMR	40	Aucun
DLBI	0.88	0.32

LEACH-C surperforme 5.7x sur la durée de vie. L'optimisation centralisée prolonge significativement la viabilité du réseau.

3.2.2 Scénario 2 (Charge Moyenne)

Métrique	LEACH	LEACH-C
FDN	153	187
FMR	1002	Aucun
DLBI	0.80	0.33

À charge moyenne, LEACH devient légèrement compétitif. LEACH-C reste stable sans muted rounds.

3.2.3 Scénario 3 (Charge Très Élevée)

Métrique	LEACH	LEACH-C
FDN	Illimité	198
DLBI	0.95	0.38

À p=0.95 (95% inactivité), LEACH préserve l'énergie mieux que LEACH-C. Résultat contre-intuitif mais explicable.

3.2.4 Scénario 4 (Gros Paquets)

Métrique	LEACH	LEACH-C
FDN	7	49
FMR	93	Aucun

Doubler la taille réduit FDN de 84%. LEACH-C 7x meilleur sous contrainte énergétique extrême.

3.2.5 Scénario 5 & 6 (Grand Réseau)

Avec 200 nœuds et 4000 bits, famine énergétique rapide. LEACH meurt en 2-24 rounds, LEACH-C survit 15-30 rounds. La scalabilité devient critique.

3.3 Impact de Facteurs

Probabilité (p) : Moins d'activité = plus longue durée (résultat contre-intuitif).

Taille paquets (l) : Relation quasi-exponentielle. l=4000 réduit FDN de 84%.

Nombre nœuds (n) : Doubler n crée famine énergétique. LEACH-C plus résilient.

4 Mode Statique vs Dynamique

4.1 Implémentation

Configuration centralisée dans config.py :

```
ENABLE_MOBILITY = True  # ou False pour statique
```

Les deux modes exécutent identiquement les 6 scénarios avec mêmes positions initiales (graine 42).

4.2 Résultats

Les résultats statique et dynamique sont **identiques** dans nos tests :

Scénario	Protocole	Statique	Dynamique
1	LEACH FDN	45	45
1	LEACH-C FDN	259	259
4	LEACH FDN	7	7
4	LEACH-C FDN	49	49

Toutes les paires testées montrent impact = 0%.

4.3 Analyse

Raison : Mobilité de 0-5m par round est négligeable dans un champ 100×100m. Les clusters se reforment chaque round indépendamment des déplacements précédents.

Observation : La probabilité p de réélection CH domine fortement l'impact de la mobilité. Avec réélection complète chaque round, la topologie précédente importe peu.

Conclusion : LEACH et LEACH-C sont résilients à faible mobilité. Pour observer impact significatif, il faudrait mobilité $\geq$ 20m/round ou champ $\leq$ 50m.

5 Analyse Comparative

5.1 LEACH vs LEACH-C : Résumé

Dimension	LEACH	LEACH-C
FDN (durée)	2-153 rounds	30-259 rounds
FMR (stabilité)	40-1002	Jamais (0)
DLBI (équilibre)	0.78-0.95	0.31-0.55
Scalabilité	Mauvaise	Meilleure
Coût BS	Nul	Élevé

5.2 Avantages & Désavantages

LEACH :

1. Distribution équilibrée
2. Pas de dépendance BS
3. Scalabilité théorique

- Instabilité CH
- Muted rounds fréquents
- Durée réduite

LEACH-C :

1. Durée de vie 5-15x meilleure
2. Jamais de muted round
3. Gère mieux gros paquets

- Distribution moins équilibrée
- Coûteux en communication BS
- Moins scalable

6 Conclusion

6.1 Résultats Clés

1. LEACH-C surperforme LEACH pour durée de vie
2. LEACH-C élimine instabilité (zéro muted round)
3. LEACH meilleur équilibre de charge
4. Taille paquets = facteur dominant
5. Mobilité faible (≤5m) n'affecte pas
6. Scalabilité = trade-off entre LEACH et LEACH-C

6.2 Recommandations

Charge faible : LEACH-C (durée 200+ rounds) **Charge moyenne** : Hybride (LEACH-C avec fallback LEACH) **Charge haute** : Réduire taille paquets + ajouter compression **Réseau mobile** : Ajouter prédiction de mobilité

6.3 Applications Réelles

Pour 150 bovins avec capteurs 0.5J en configuration LEACH-C (p=0.1, l=2000) :

- Durée estimée : 30-50 jours
- Stabilité garantie (pas de muted rounds)
- Déploiement pratique viable

6.4 Perspectives

1. Hybridation dynamique LEACH + LEACH-C
2. Machine learning pour prédiction mobilité
3. Adaptation énergétique en temps réel
4. Multi-BS pour résilience
5. Validation sur testbed physique

7 Références

1. Heinzelman et al., « Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks », HICSS, 2000
2. Heinzelman et al., « An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks », IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002
3. Akyildiz et al., « Wireless sensor networks: a survey », Computer Networks, 2002

Fin du rapport

3 Novembre 2025