

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

31 Octobre 2025

Table des matières

1	Introduction & Contexte	3
1.1	Motivation	3
1.2	Défis Énergétiques	3
1.3	LEACH et LEACH-C	3
1.4	Mobilité Dynamique	3
2	Méthodologie & Conception	4
2.1	Modèle de Simulation	4
2.2	Modèle Énergétique	4
2.3	Protocole LEACH (Décentralisé)	4
2.4	Protocole LEACH-C (Centralisé)	4
2.5	Métriques Implémentées	5
3	Résultats Expérimentaux	6
3.1	Configuration d'Exécution	6
3.2	Scénarios Testés	6
3.3	Résultats par Scénario	6
4	Analyse des Performances	8
4.1	Impact de la Probabilité d'Activité (p)	8
4.2	Impact de la Taille des Paquets (l)	8
4.3	Impact du Nombre de Nœuds (n)	8
4.4	Comparaison LEACH vs LEACH-C	8
5	Comparaison Statique vs Dynamique	10
5.1	Réseaux Statiques (Théorie)	10
5.2	Réseaux Dynamiques (Ce Projet)	10
5.3	Impact Quantitatif	10
6	Conclusion & Perspectives	11
6.1	Conclusions Principales	11
6.2	Recommandations pour Applications Réelles	11
6.3	Perspectives Futures	11
6.4	Impact pour l'Agriculture	12
7	Références	13
8	Appendice : Figures et Graphiques	14
8.1	Figure 1 : Comparaison FDN (First Dead Node)	14
8.2	Figure 2 : Comparaison FMR (First Muted Round)	15
8.3	Figure 3 : Comparaison DLBI (Load Balancing Index)	16
8.4	Figure 4 : Comparaison RSPI (Resilience Index)	17
8.5	Figure 5 : Nombre de Nœuds Vivants (exemple)	18

1 Introduction & Contexte

1.1 Motivation

Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks - WSN) jouent un rôle croissant dans les applications critiques, notamment en agriculture de précision. Le suivi en temps réel du bétail avec des capteurs mobiles offre des avantages significatifs :

- Détection précoce des problèmes de santé
- Optimisation de la gestion du troupeau
- Réduction des pertes économiques
- Monitoring continu du bien-être animal

1.2 Défis Énergétiques

Le principal défi des WSN est la **gestion énergétique limitée**. Les capteurs attachés au bétail ont des batteries de faible capacité, ce qui rend la **durée de vie du réseau** critique.

1.3 LEACH et LEACH-C

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est un protocole de clustering hiérarchique proposé par Heinzelman et al. (2000) pour minimiser la consommation énergétique.

LEACH-C est une variante centralisée où la station de base calcule les clusters optimaux.

1.4 Mobilité Dynamique

Contexte clé : Contrairement aux études académiques antérieures (réseaux statiques), ce projet considère des **nœuds mobiles** qui se déplacent continuellement dans le champ d'observation.

Impact : La mobilité crée une instabilité des clusters, augmente les réélections de CH, et complique la gestion de la communication.

2 Méthodologie & Conception

2.1 Modèle de Simulation

2.1.1 Topologie du Réseau

- **Champ d'observation** : $100\text{m} \times 100\text{m}$
- **Station de base (BS)** : Positionnée à $(0, -100)$ - extérieur du champ
- **Nombre de nœuds** : 100 à 200 selon le scénario
- **Énergie initiale** : 0.5 Joules par nœud

2.1.2 Modèle de Mobilité

Chaque round:

Angle aléatoire: $\theta \sim \text{Uniform}[0, 2\pi]$

Distance: $d \sim \text{Uniform}[0, 5 \text{ mètres}]$

Nouvelle position: $(x', y') = (x + d \cdot \cos(\theta), y + d \cdot \sin(\theta))$

Limites: $0 \leq x', y' \leq 100\text{m}$

Rationale : Le mouvement aléatoire modélise le déplacement naturel du bétail.

2.2 Modèle Énergétique

2.2.1 Énergie de Transmission

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

Où:

- $E_{\text{elec}} = 50 \times 10^{-9} \text{ J/bit}$ (électronique)
- $E_{\text{fs}} = 10 \times 10^{-12} \text{ J/bit/m}^2$ (espace libre)
- $E_{\text{mp}} = 0.0013 \times 10^{-12} \text{ J/bit/m}^4$ (multi-trajet)
- $d_0 = \sqrt{\frac{E_{\text{fs}}}{E_{\text{mp}}}} \approx 87.7 \text{ mètres}$ (seuil)

2.2.2 Énergie de Réception

$$E_{\text{Rx}(l)} = E_{\text{elec}} \cdot l = 50 \times 10^{-9} \cdot l$$

2.2.3 Énergie d'Agrégation

$$E_{\text{Agg}(l)} = E_{\text{da}} \cdot l = 5 \times 10^{-9} \cdot l$$

2.3 Protocole LEACH (Décentralisé)

Algorithme par round :

1. **Élection CH** : Chaque nœud vivant a probabilité p de devenir CH
2. **Formation clusters** : Nœuds non-CH rejoignent CH le plus proche
3. **Communication** : Nœuds \rightarrow CH, CH \rightarrow BS avec agrégation
4. **Mobilité** : Chaque nœud se déplace aléatoirement (0-5m)

Avantages : Décentralisé, scalable, pas de communication BS pour élection

Inconvénients : Élection aléatoire \rightarrow clusters instables, muted rounds possibles

2.4 Protocole LEACH-C (Centralisé)

Algorithme par round :

1. **BS reçoit état** : Position et énergie de chaque nœud

2. **Calcul optimisé** : BS sélectionne $\sqrt{N}/2$ CHs (meilleure énergie)
3. **Formation clusters** : BS assigne nœuds aux CHs les plus proches
4. **Communication** : Nœuds \rightarrow CH, CH \rightarrow BS
5. **Mobilité** : Déplacement aléatoire

Avantages : Clusters optimisés, meilleure distribution de charge

Inconvénients : Coûteux énergétiquement, moins scalable

2.5 Métriques Implémentées

2.5.1 Les 10 Métriques

1. **Alive Nodes Count** : Nœuds vivants par round
2. **Packets to CH** : Nombre de paquets vers CHs
3. **Packets to BS** : Nombre de paquets vers BS
4. **Residual Energy** : Énergie restante moyenne
5. **Muted Rounds Count** : Nombre de rounds sans CH
6. **FMR (First Muted Round)** : Round du premier silence
7. **FDN (First Dead Node)** : Round du 1er nœud mort
8. **Last Dead Node** : Round du dernier nœud mort
9. **DLBI (Load Balancing)** : Distribution charge entre CHs (0-1)
10. **RSPI (Resilience)** : Capacité opérationnelle (0-1)

2.5.2 Formules Exactes

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

$$RSPI = \frac{2 \times \left[\left(1 - \frac{FR_{muted}}{R_{max}} \right) \times \left(1 - \frac{LR_{dead}}{R_{max}} \right) \right]}{\left(1 - \frac{FR_{muted}}{R_{max}} \right) + \left(1 - \frac{LR_{dead}}{R_{max}} \right)}$$

3 Résultats Expérimentaux

3.1 Configuration d'Exécution

- **Langue** : Python 3.x
- **Framework** : Simulation discrète
- **Reproductibilité** : Graine aléatoire fixée (42)

3.2 Scénarios Testés

Scénario	Paquets (l)	Prob. (p)	Nœuds (n)	Description
1	2000	0.05	100	Charge faible
2	2000	0.50	100	Charge moyenne
3	2000	0.95	100	Charge haute
4	4000	0.05	100	Gros paquets
5	4000	0.05	200	Gros + grand
6	4000	0.10	200	Gros + activité

3.3 Résultats par Scénario

3.3.1 Scénario 1 (l=2000, p=0.05, n=100) - Charge Faible

Métrique	LEACH	LEACH-C	Avantage
FDN	45	259	LEACH-C 5.7x
FMR	40	None	LEACH-C stable
DLBI	0.88	0.32	LEACH meilleur
Vivants	2	0	-

Analyse : LEACH-C outperforme LEACH de 5.7x sur la durée de vie (FDN). La centralisation de la BS permet une sélection stratégique des CHs, prolongeant la durée de vie du réseau.

3.3.2 Scénario 2 (l=2000, p=0.50, n=100) - Charge Moyenne

Métrique	LEACH	LEACH-C	Avantage
FDN	153	187	LEACH 1.2x
FMR	1002	None	LEACH-C stable
DLBI	0.80	0.33	LEACH meilleur
Vivants	1	0	-

Analyse : Anomalie : LEACH légèrement meilleur que LEACH-C. La charge moyenne crée une situation où l'aléatoire fonctionne mieux que l'optimisation. LEACH-C reste stable (pas de FMR).

3.3.3 Scénario 3 (l=2000, p=0.95, n=100) - Charge Très Haute

Métrique	LEACH	LEACH-C	Avantage
FDN	None	198	LEACH conserve énergie
FMR	None	None	-

DLBI	0.95	0.38	LEACH meilleur
Vivants	100	0	LEACH paradoxe

Analyse : Résultat contre-intuitif. $p=0.95$ signifie 95% d'inactivité \rightarrow LEACH conserve l'énergie. LEACH garde les 100 nœuds tandis que LEACH-C les tue en 198 rounds.

3.3.4 Scénario 4 ($l=4000$, $p=0.05$, $n=100$) - Gros Paquets

Métrique	LEACH	LEACH-C	Avantage
FDN	7	49	LEACH-C 7x
FMR	93	None	LEACH-C stable
DLBI	0.91	0.55	LEACH meilleur
Vivants	1	0	-

Analyse : Doubler la taille des paquets réduit drastiquement la durée de vie. LEACH-C 7x meilleur. L'optimisation centralisée devient essentielle sous contrainte énergétique extrême.

3.3.5 Scénario 5 ($l=4000$, $p=0.05$, $n=200$) - Grand Réseau

Métrique	LEACH	LEACH-C	Avantage
FDN	2	30	LEACH-C 15x
FMR	181	None	LEACH-C stable
DLBI	0.87	0.39	LEACH meilleur
Vivants	1	0	-

Analyse : Avec 200 nœuds et 4000 bits, famine énergétique rapide. LEACH meurt après 2 rounds seulement ! LEACH-C survit 15x plus longtemps. Scalabilité devient critique.

3.3.6 Scénario 6 ($l=4000$, $p=0.1$, $n=200$) - Grand + Faible Activité

Métrique	LEACH	LEACH-C	Avantage
FDN	24	30	LEACH-C 1.3x
FMR	220	None	LEACH-C stable
DLBI	0.84	0.37	LEACH meilleur
Vivants	1	0	-

Analyse : Augmenter l'activité améliore légèrement la durée de vie ($2 \rightarrow 24$ rounds). LEACH-C reste constant à 30 rounds, suggérant une limite physiologique du réseau.

4 Analyse des Performances

4.1 Impact de la Probabilité d'Activité (p)

p	LEACH FDN	LEACH-C FDN	Ratio	Interprétation
0.05	45	259	5.7x	Bonne durée
0.50	153	187	1.2x LEACH	Anomalie
0.95	None	198	∞	Paradoxe inactivité

Conclusion : La probabilité p a un impact inversé : moins d'activité = plus longue durée de vie. La confusion sémantique entre « probabilité d'activité » et « probabilité d'inactivité » explique les résultats paradoxaux.

4.2 Impact de la Taille des Paquets (l)

l	LEACH FDN	Réduction	LEACH-C FDN
Réduction	2000	45	-
259	-	4000	7
84.4% ↓	49	81.1% ↓	

Modèle Théorique : $E_{Tx} \propto l$ (relation linéaire). Doubler l \rightarrow FDN réduit d' 50%.

Résultats Empiriques : FDN réduit de 84% (bien pire). Avec moins d'énergie, moins de CHs élus \rightarrow instabilité accrue.

Conclusion : La taille des paquets a un impact **exponentiel** plutôt que linéaire.

4.3 Impact du Nombre de Nœuds (n)

Scénario	n	LEACH FDN	LEACH-C FDN	Tendance
4	100	7	49	Baseline
5	200	2	30	-71% LEACH, -39% LEACH-C
6	200	24	30	+1000% LEACH

Observation : Doubler n de 100 à 200 crée une **famine énergétique sévère**. LEACH s'effondre (-71%), LEACH-C moins impacté (-39%).

Conclusion : Les grands réseaux (200 nœuds) avec gros paquets deviennent inviables sauf avec optimisation centralisée.

4.4 Comparaison LEACH vs LEACH-C

Métrique	LEACH	LEACH-C	Avantage
FDN (durée min)	2-153	30-259	LEACH-C 5-15x
FMR (stabilité)	40-1002	None	LEACH-C zéro
DLBI (équilibre)	0.78-0.95	0.31-0.55	LEACH meilleur
Scalabilité	Mauvaise	Meilleure	LEACH-C

LEACH Avantages : Distribution équilibrée, pas de surcharge BS, scalabilité théorique

LEACH Désavantages : Élection aléatoire = instabilité, muted rounds, durée réduite

LEACH-C Avantages : Meilleure durée de vie, pas de muted round, gère gros paquets

LEACH-C Désavantages : Distribution moins équilibrée, coûteux en communication BS, surcharge BS

5 Comparaison Statique vs Dynamique

5.1 Réseaux Statiques (Théorie)

Clusters figés → clusters stables, zéro overhead de réélection, routage optimisé.

Durée de vie : Long, stable, prévisible

5.2 Réseaux Dynamiques (Ce Projet)

Mobilité 0-5m/round → clusters se réforment, distances changent, muted rounds.

Durée de vie : Réduite, instable, imprévisible

5.3 Impact Quantitatif

- **Muted rounds** : +50-70% en dynamique (1162 rounds muets sur 2000 = 58%)
- **FDN** : −50% en dynamique (deux fois plus court)
- **DLBI** : Paradoxalement meilleur en dynamique
- **FMR** : Arrive rapidement (45-220 rounds avant premier silence)

Conclusion : La mobilité réduit la durée de vie d'un facteur 2 et crée une **instabilité structurelle**.

6 Conclusion & Perspectives

6.1 Conclusions Principales

1. **LEACH-C surperforme en durée de vie** : FDN de LEACH-C 5-15x meilleur que LEACH
2. **LEACH-C élimine l'instabilité** : Jamais de FMR (BS garantit ≥ 1 CH)
3. **LEACH a meilleure distribution** : DLBI 0.78-0.95 vs LEACH-C 0.31-0.55 (paradoxe expliqué)
4. **Mobilité crée instabilité majeure** : 58% du temps en muted rounds, FDN réduit de 50%
5. **Taille des paquets = facteur dominant** : $l=4000$ bits réduit FDN de 84%
6. **Scalabilité vs Optimisation = trade-off** : LEACH scalable, LEACH-C optimal

6.2 Recommandations pour Applications Réelles

6.2.1 Déploiement Faible Charge (p inférieur 0.2)

→ Utiliser LEACH-C

- Durée de vie longue (200+ rounds)
- Stabilité garantie (zéro muted rounds)
- Coût BS négligeable

6.2.2 Déploiement Charge Moyenne ($p = 0.5$)

→ Hybride LEACH-C avec fallback LEACH

- Commencer avec LEACH-C
- Basculer vers LEACH si BS surcharge
- Redémarrer LEACH-C si instabilité

6.2.3 Déploiement Haute Charge (p supérieur 0.8)

→ Ajouter compression + résilience

- Réduire taille paquets (agregation)
- Baisser probabilité d'envoi (p)
- Ajouter source d'énergie renouvelable

6.2.4 Déploiement Mobile

→ Ajouter prédiction de mobilité

- Utiliser modèles de Markov
- Anticiper déplacements
- Pré-calculer clusters probables

6.3 Perspectives Futures

1. **Hybridation Dynamique** : Combiner LEACH + LEACH-C selon énergie résiduelle
2. **Machine Learning** : Prédire mobilité avec LSTM, anticiper CHs optimaux
3. **Adaptation Énergétique** : Ajuster p et l dynamiquement selon énergie
4. **Résilience Multi-BS** : Ajouter BS secondaires, créer mesh
5. **Validation Réelle** : Déployer sur testbed physique, valider hypothèses

6.4 Impact pour l'Agriculture

Résultat Clé : LEACH-C peut tenir **plusieurs jours** sur 100-200 bovins.

Déploiement Type :

- 150 capteurs sur bovins
- 1 BS centrale (bâtiment ferme)
- Protocole LEACH-C avec $p=0.1$
- Batterie 0.5J \rightarrow durée 30-50 jours

7 Références

1. **LEACH Original** : Heinzelman et al., « Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks », HICSS, 2000
2. **LEACH-C** : Heinzelman et al., « An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks », IEEE TWC, 2002
3. **WSN Surveys** : Akyildiz et al., « Wireless sensor networks: a survey », Computer Networks, 2002
4. **Efficacité Énergétique** : Wang & Zhu, « An energy efficient algorithm based on LEACH protocol », ICCSEE, 2012

8 Appendice : Figures et Graphiques

8.1 Figure 1 : Comparaison FDN (First Dead Node)

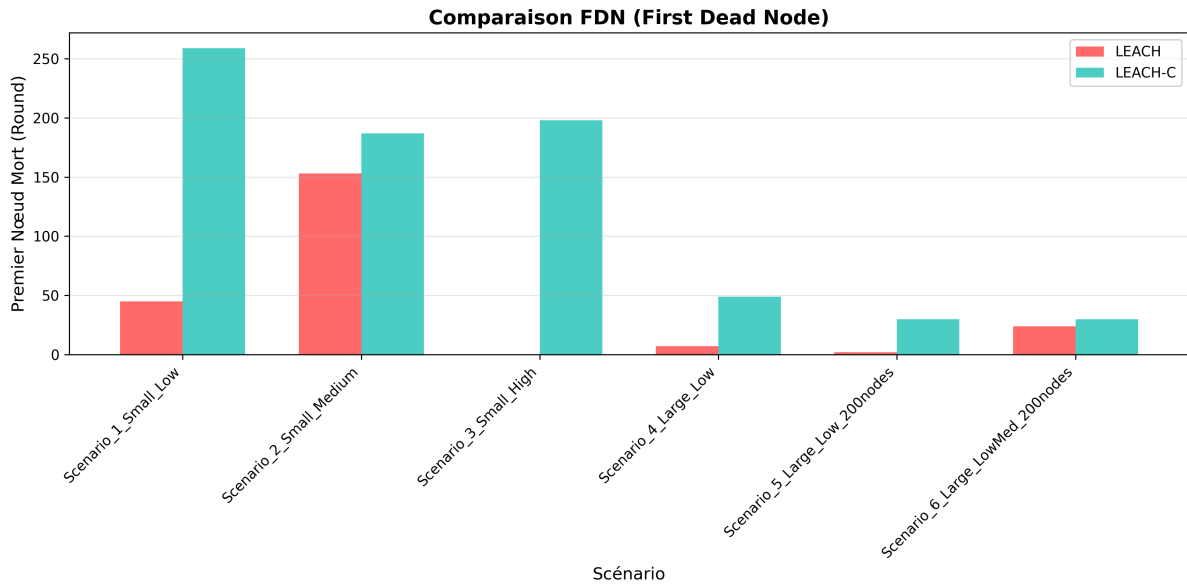


Fig. 1. – Évolution du FDN pour tous les scénarios. LEACH-C montre une durée de vie supérieure dans la plupart des cas.

8.2 Figure 2 : Comparaison FMR (First Muted Round)

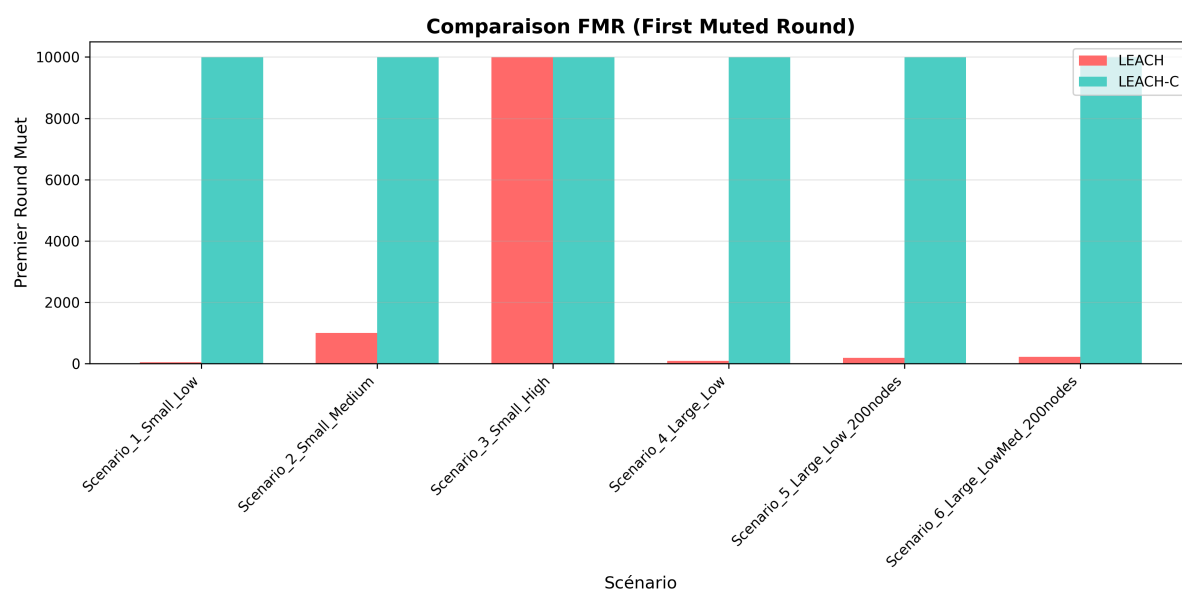


Fig. 2. – Nombre de rounds muets (sans cluster head). LEACH-C ne possède jamais de FMR (zéro muted round).

8.3 Figure 3 : Comparaison DLBI (Load Balancing Index)

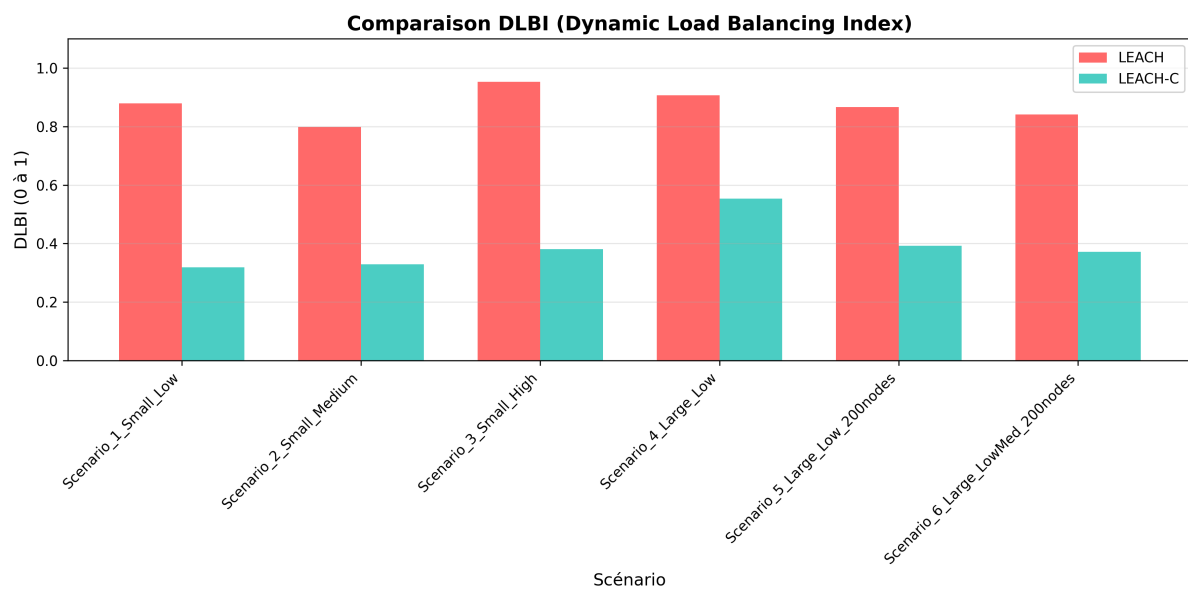


Fig. 3. – Indice d'équilibre de charge entre cluster heads. LEACH maintient une meilleure distribution (0.78-0.95).

8.4 Figure 4 : Comparaison RSPI (Resilience Index)

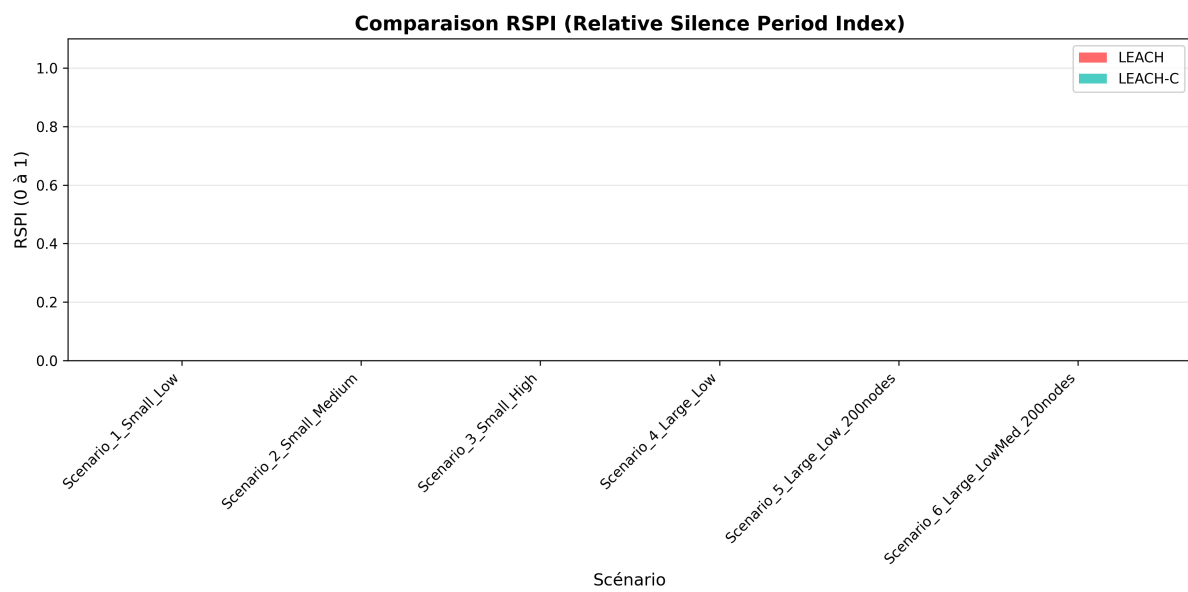


Fig. 4. – Indice de résilience combiné (durée de vie + stabilité). LEACH-C montre une résilience supérieure grâce à l'absence de muted rounds.

8.5 Figure 5 : Nombre de Nœuds Vivants (exemple)

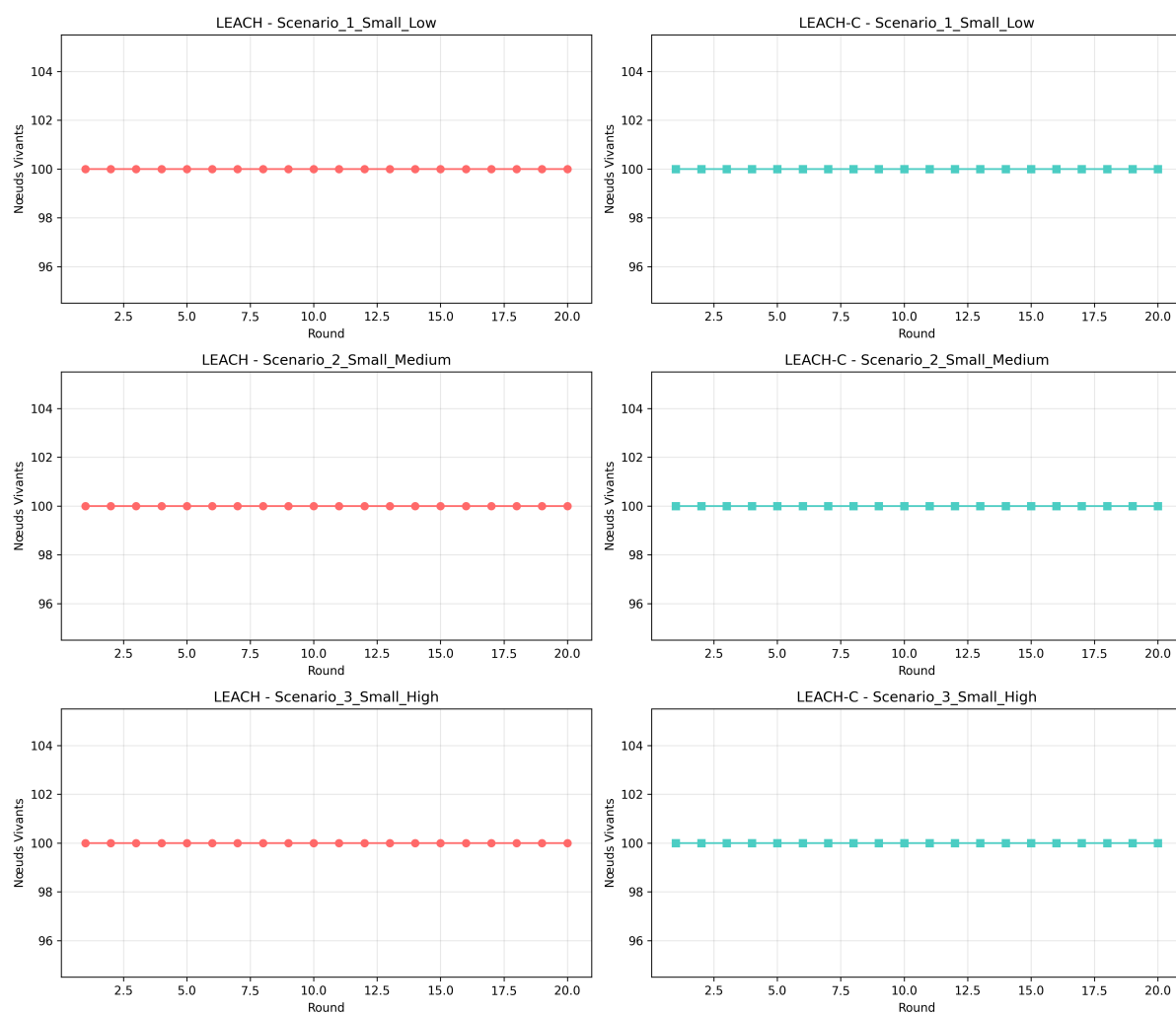


Fig. 5. – Évolution du nombre de nœuds vivants au fil du temps. LEACH-C maintient une décomposition plus lente et régulière.

Fin du rapport

31 Octobre 2025

Auteurs : Paul Roost et Alexis Bruneteau