

Fiabilité de l'Architecture Réseau des Systèmes Distribués sur Essaims de Nanosatellites

Evelyne Akopyan - TéSA, IRIT, Toulouse INP

Encadrée par :

Riadh Dhaou - Toulouse INP

Emmanuel Lochin - ENAC

Bernard Pontet - CNES

Jacques Sombrin - TéSA

Membres du jury :

Isabelle Guérin-Lassous - Université Claude Bernard Lyon 1

Marcelo Dias De Amorim - Sorbonne Université

Razvan Stanica - INSA Lyon

Nathalie Mitton - INRIA Lille

Riadh Dhaou - Toulouse INP

Emmanuel Lochin - ENAC

Bernard Pontet - CNES, invité

18 octobre 2024



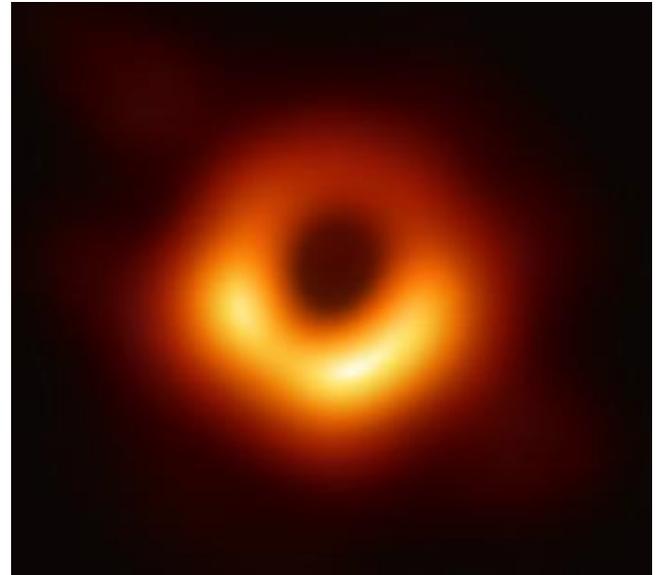
Introduction à l'interférométrie basse fréquence

Interférométrie : technique d'imagerie spatiale faisant des observations à partir des signaux basse fréquence (en dessous de 100 MHz)



ALMA, désert d'Atacama,
Chili

Première image d'un trou
noir (2019)



Introduction aux problèmes

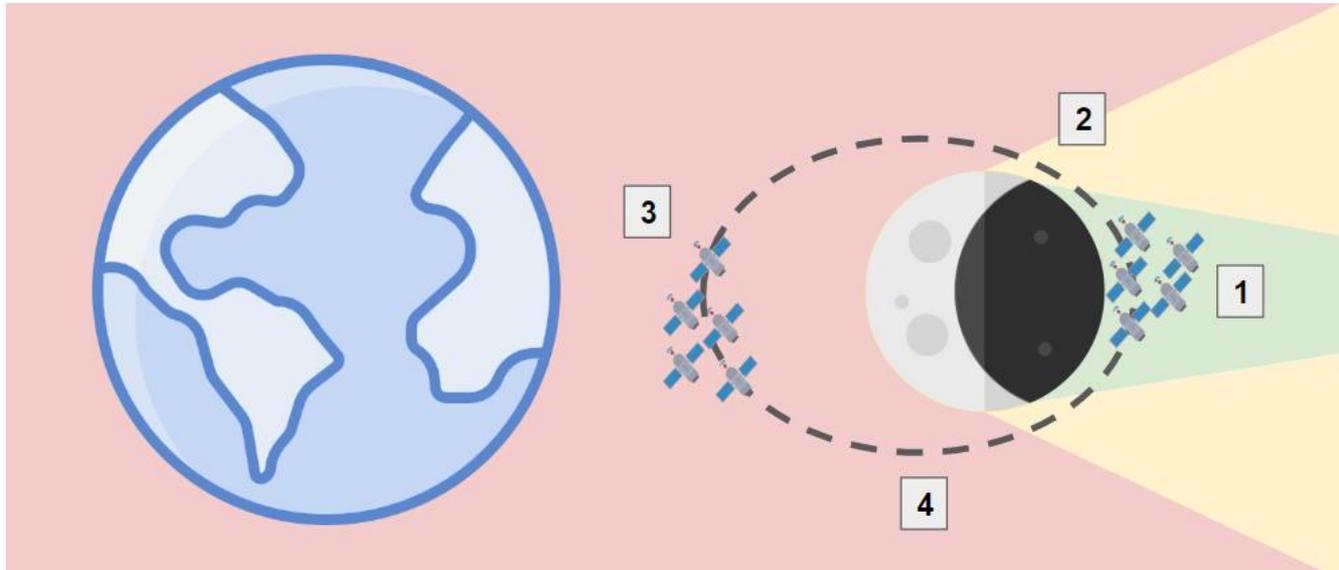
Observation difficile (parfois impossible) des signaux en dessous de 10 MHz :

- ❑ Absorption par les molécules d'eau
- ❑ Distorsion par l'ionosphère
- ❑ Sensibilité aux interférences radioélectriques terrestres

Solution évidente : observer depuis l'Espace

Proposition d'interféromètre spatial

Système : déployer un essaim de nanosatellites en orbite lunaire (étude NOIRE [1])



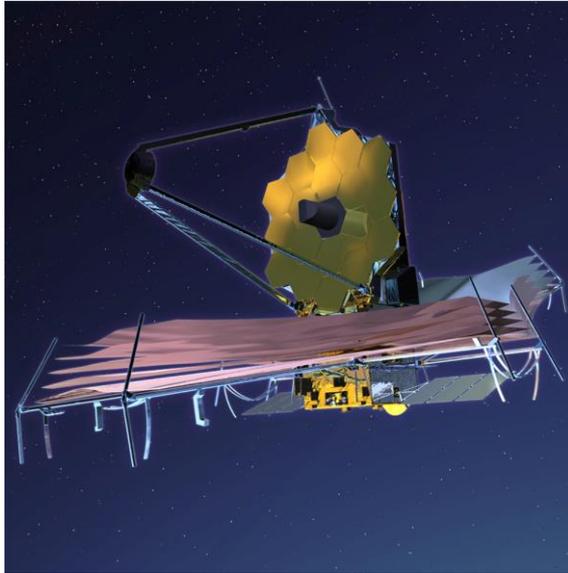
[1] Cecconi, B., et al. "NOIRE study report: towards a low frequency radio interferometer in Space". IEEE Aerospace Conference (2018)

Comment fiabiliser un essaim de nanosatellites pour une mission d'interférométrie ?

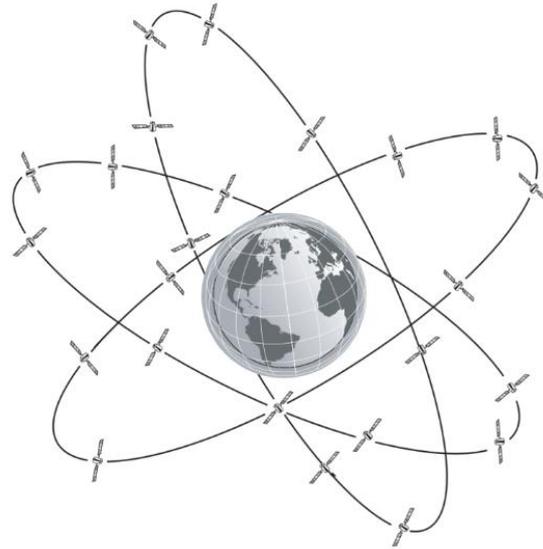
Partie I : Prendre exemple sur l'existant

1. Choix de l'architecture du système
2. Principe de communication
3. Techniques de fiabilisation

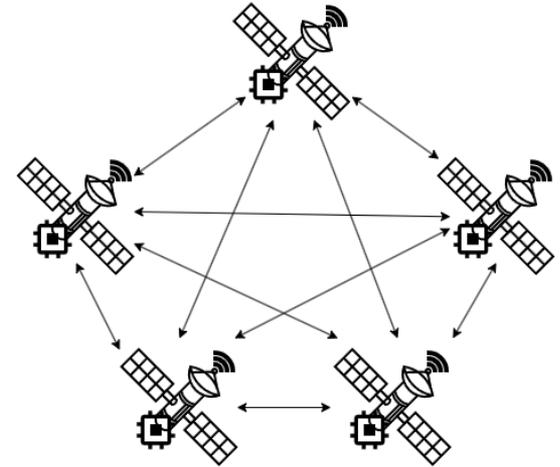
I.1 Choix de l'architecture du système



Satellite monolithique
(James Webb)



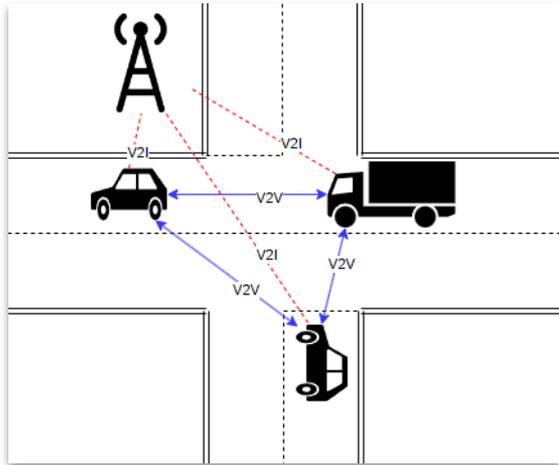
Constellation (Galileo)



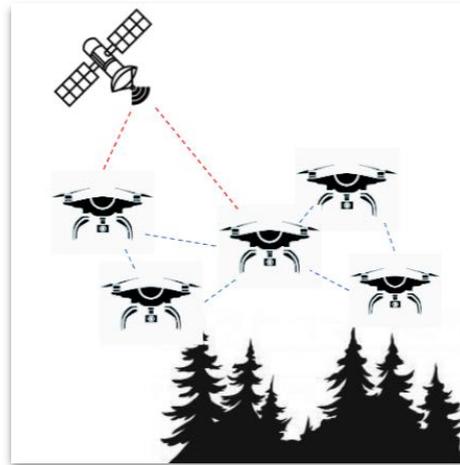
Essaim (NOIRE)

I.2 Principe de communication

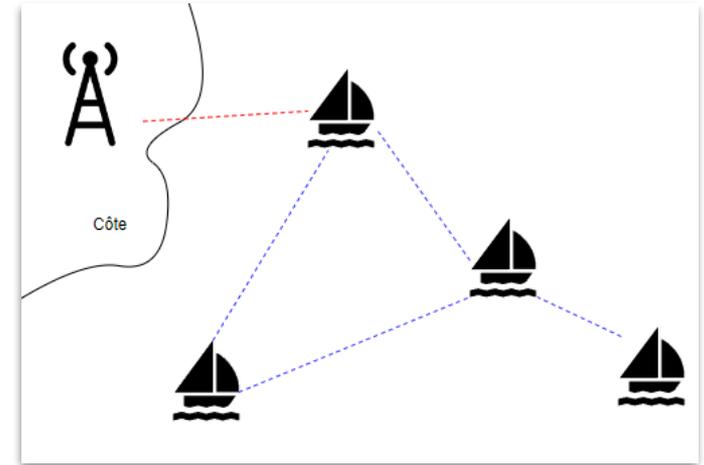
Mobile Ad-hoc Network (MANET) : réseau mobile sans infrastructure dédiée



Réseau routier (VANET)



Réseau de drones (FANET)



Réseau maritime (SANET)

I.3 Techniques de fiabilisation

- ❑ Mécanismes d'économie d'énergie, optimisation des trajets [2]
- ❑ Contrôle de congestion, répartition de la charge [3]
- ❑ Mise en place de chemins alternatifs [4]

En résumé : fiabiliser l'essaim de nanosatellites comme un MANET

[2] Alyassi, R., et al. "Autonomous recharging and flight mission planning for battery-operated autonomous drones". IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (2023)

[3] Kazmi, H. S. Z., et al. "Congestion avoidance and fault detection in WSN using data science techniques". Transactions on Emerging Telecommunications Technologies (2022)

[4] Sivapriya, D. N., et al. "Multi-constraint multicasting analysis with fault tolerance routing mechanism". Telematique (2022)

Partie II : Diviser pour mieux régner

1. Recherche d'une solution adaptée
2. Introduction au clustering
3. Impact du clustering sur la fiabilité

II.1 Recherche d'une solution adaptée

- ❑ Particularités de l'essaim :
 - ❑ Système distribué autonome : peu de contrôle sur son fonctionnement
 - ❑ Pas de centralisation
 - ❑ Faible puissance de calcul embarquée
- ❑ Forte complexité calculatoire des mécanismes cités

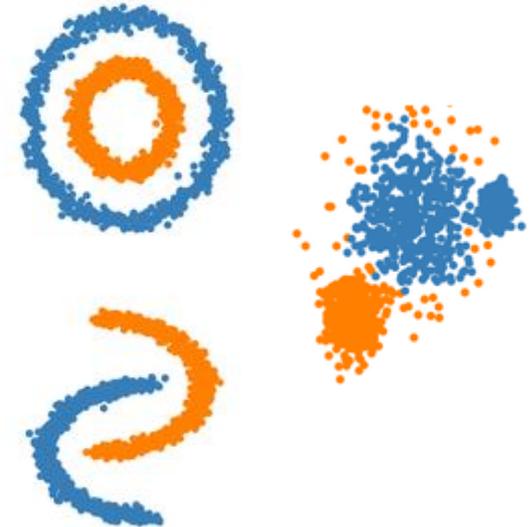
Solution préconisée pour fiabiliser un tel système distribué : le *clustering*

II.2 Introduction au clustering

Clustering : technique consistant à agréger des entités similaires (d'après certains critères) dans des groupes



Clustering géographique



Clustering par densité

II.3 Impact du clustering sur la fiabilité

- ❑ Résultat connu : le clustering permet de réduire la charge du réseau [5]
 - ❑ Moins de routes dans un réseau de transport
 - ❑ Moins de communications dans un réseau de satellites
- ❑ Réduction de la consommation énergétique des noeuds du réseau
- ❑ Prolongation de la durée de vie du système

En résumé : fiabiliser l'essaim de nanosatellites en formant des groupes

[5] Budianu, A., et al. "OLFAR: Adaptive topology for satellite swarms". International Astronautical Congress (2011)

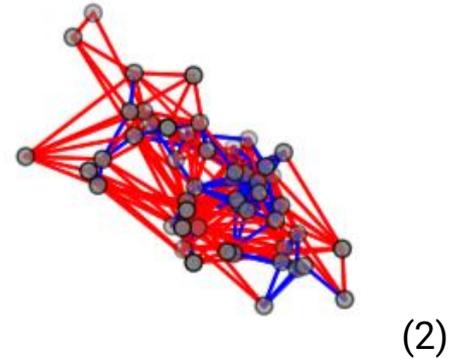
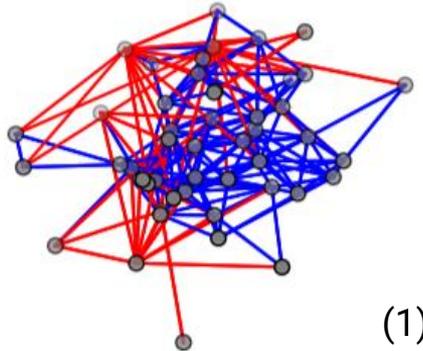
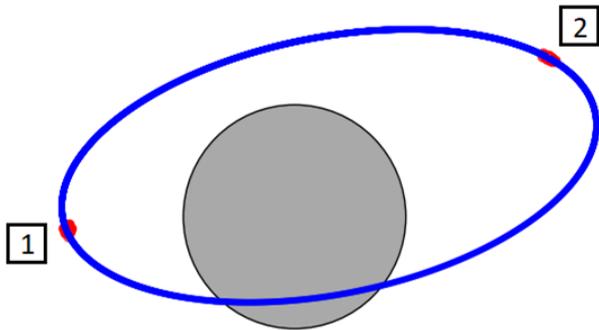
Partie III : La division équitable

1. Modélisation du système
2. Propriétés du réseau de l'essaim
3. Obtenir une division équitable
4. Analyse des performances

III.1 Modélisation du système

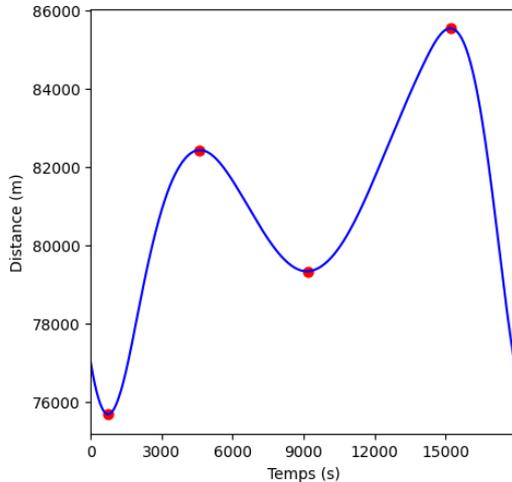
Modélisation mathématique par la théorie des graphes

- ❑ Ensemble des sommets V : nanosatellites
- ❑ Ensemble des arêtes pondérées E : liens inter-satellites
- ❑ Graphe pondéré non-orienté : essaim



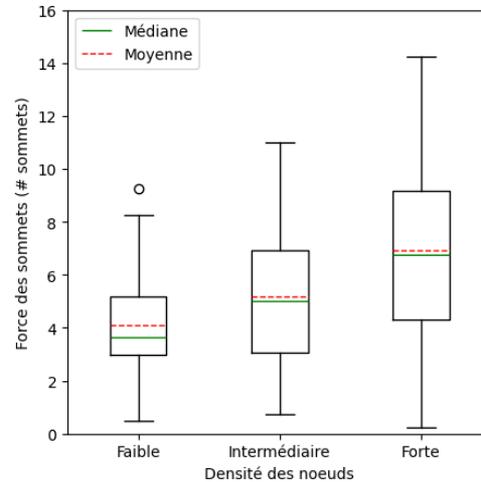
III.2 Propriétés du réseau de l'essaim

Distance relative des satellites



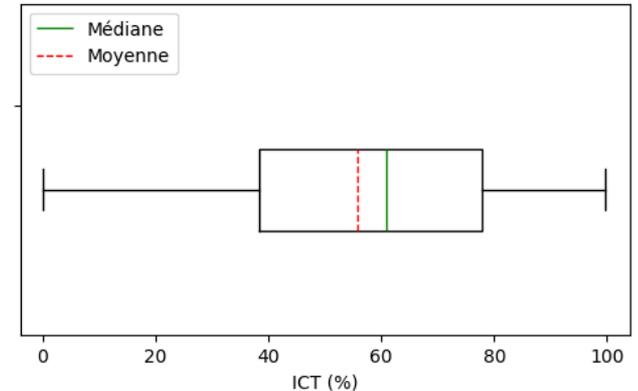
P1 : double modèle de mobilité

Densité des satellites



P2 : densité hétérogène

Disponibilité des liens inter-satellites



P3 : disponibilité variable, liens dynamiques

III.3 Obtenir une division équitable

Division de graphe : technique consistant à agréger des entités de sorte à ce que les groupes formés soient similaires (selon certains critères)

Algorithmes proposés :

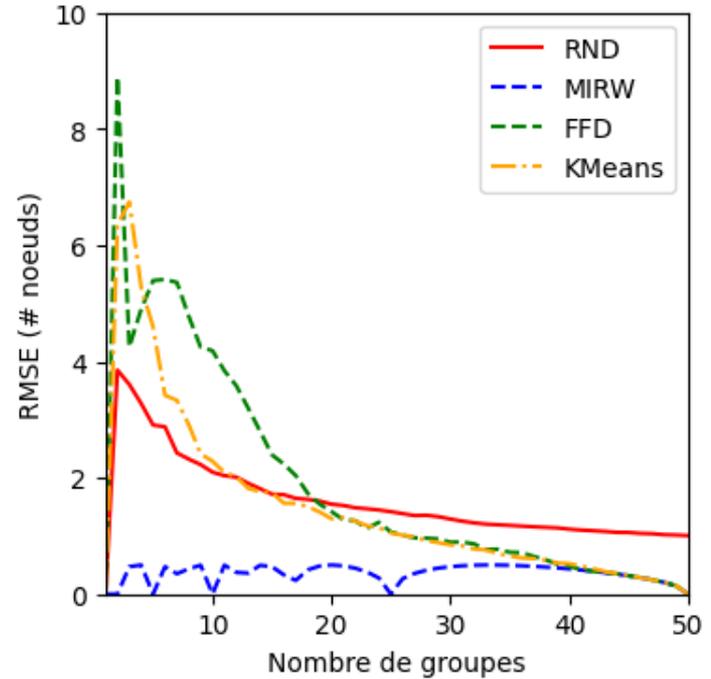
- ❑ *Random Node Division* (RND) : sélection aléatoire de noeuds
- ❑ *Multiple Independent Random Walks* (MIRW) : propagation par marche aléatoire
- ❑ *Forest Fire Division* (FFD) : propagation épidémique
- ❑ *K-means* : agrégation géographique en k groupes (clustering)

III.4 Analyse des performances (1/3)

Distribution équitable du nombre de noeuds par groupe :

- ❑ Moins d'erreur en augmentant le nombre de groupes
- ❑ Excellentes performances de **MIRW** en général
- ❑ **K-means** médiocre lorsque $k < 10$

MIRW garantit de faire des groupes de même taille.

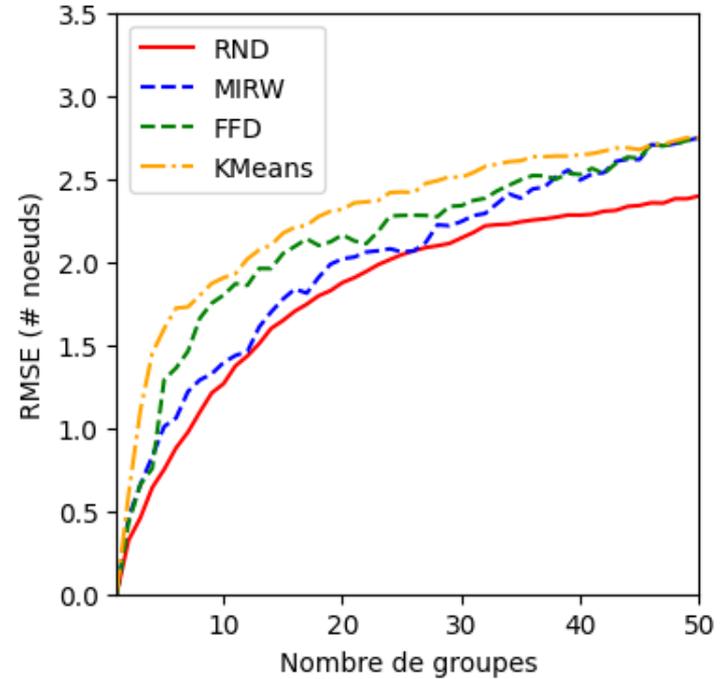


III.4 Analyse des performances (2/3)

Préservation des propriétés du réseau
(densité) :

- ❑ Croissance de l'erreur avec le nombre de groupes
- ❑ Meilleurs résultats pour **RND**
- ❑ Pires résultats pour **k-means**

RND permet d'établir des groupes très similaires au graphe de référence.

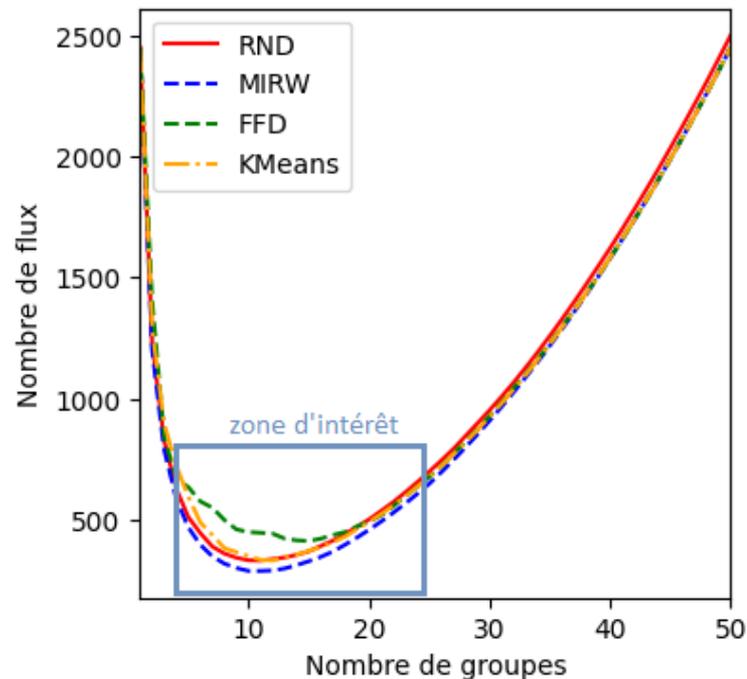


III.4 Analyse des performances (3/3)

Limitation de la consommation énergétique :

- ❑ Réduction drastique du nombre de flux
- ❑ Réduction maximale pour une division en 10 groupes
- ❑ Meilleurs résultats pour **MIRW**

La division permet d'économiser fortement l'énergie des satellites.



Partie IV : Le concept de fiabilité réseau

1. Définition de la fiabilité réseau
2. Comment évaluer la fiabilité d'un système
3. Impact de la division sur la fiabilité
4. En résumé

IV.1 Définition de la fiabilité réseau

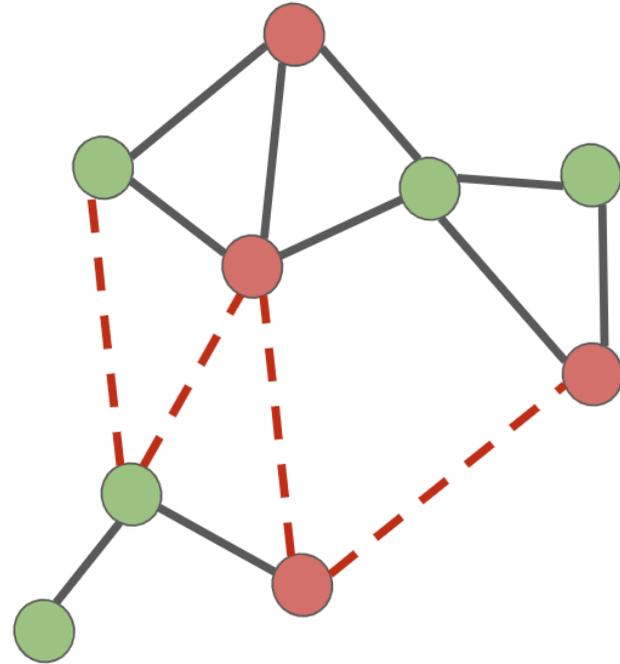
- ❑ Robustesse : capacité d'un système à résister aux pannes, ou à les éviter
- ❑ Résilience : capacité d'un système à maintenir un niveau de fonctionnement malgré la présence de pannes
- ❑ Fiabilité : capacité d'un système à prévenir et tolérer les pannes

Fiabilité : combinaison de mécanismes de robustesse et de résilience

IV.2 Comment évaluer la robustesse d'un système

Métriques de robustesse :

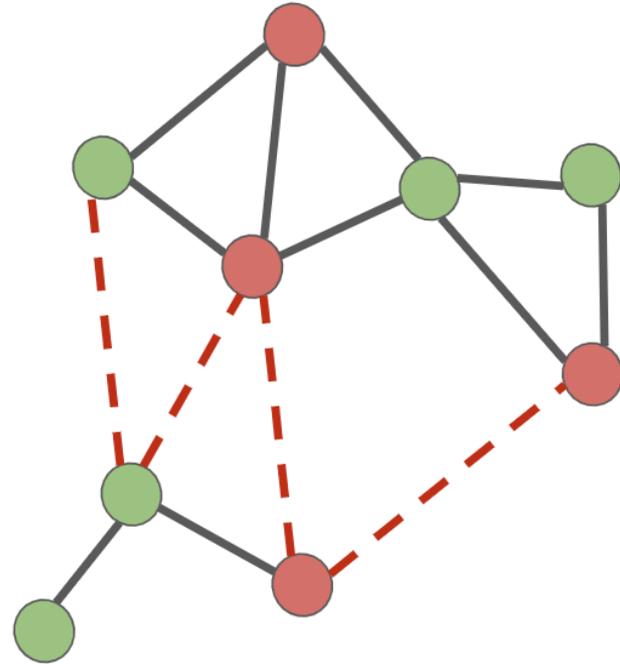
- Robustesse de flux
- Coût de routage
- Efficience réseau



IV.2 Comment évaluer la résilience d'un système

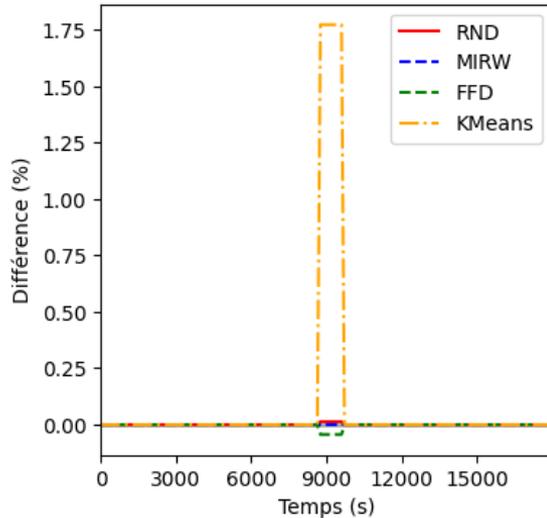
Métriques de résilience :

- Redondance des chemins
- Disparité des chemins
- Présence de noeuds critiques (criticité)

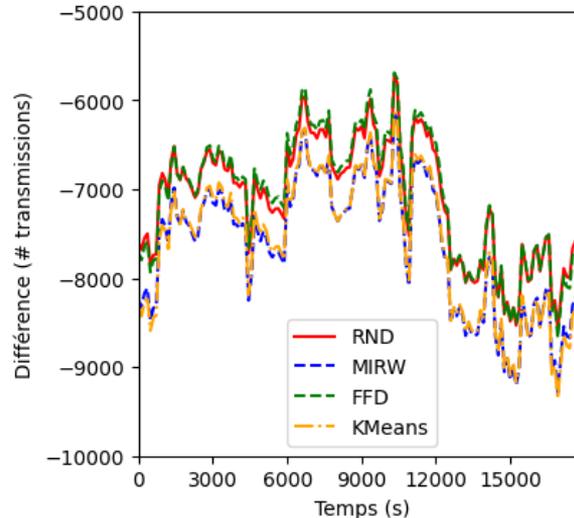


IV.III Impact de la division sur la fiabilité (1/2)

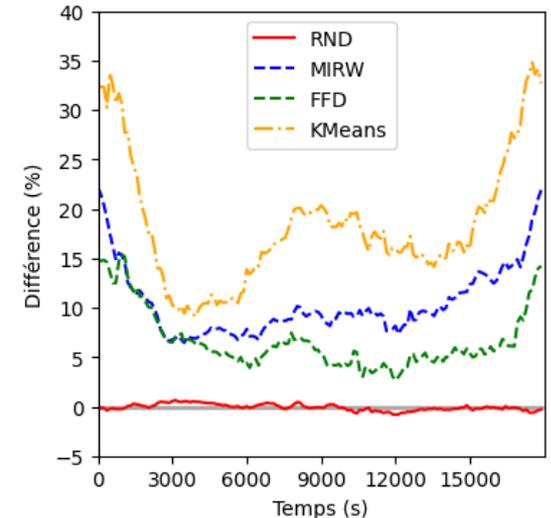
Robustesse de flux ↗



Coût de routage ↘

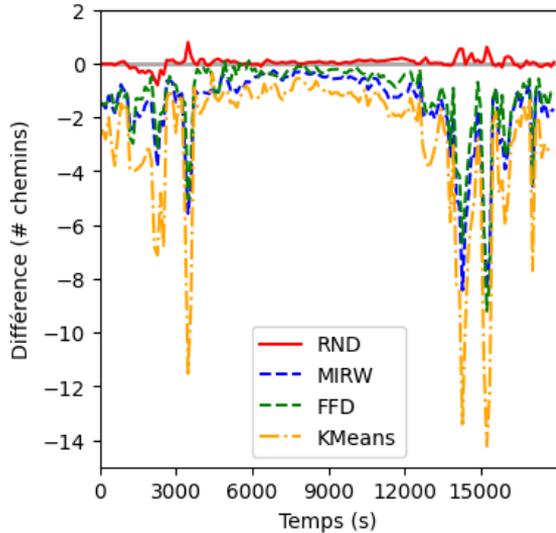


Efficacité réseau ↗

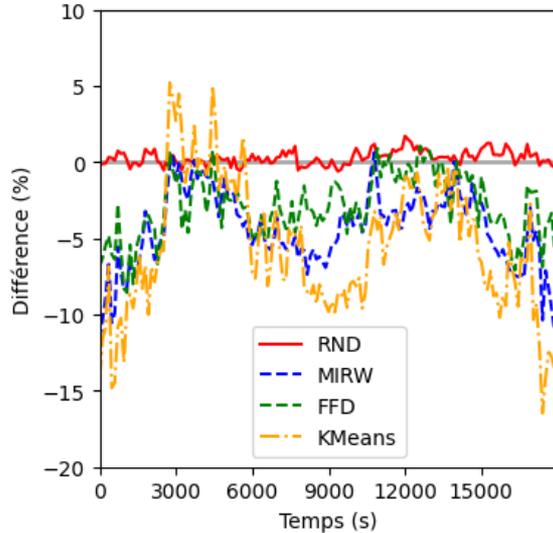


IV.III Impact de la division sur la fiabilité (2/2)

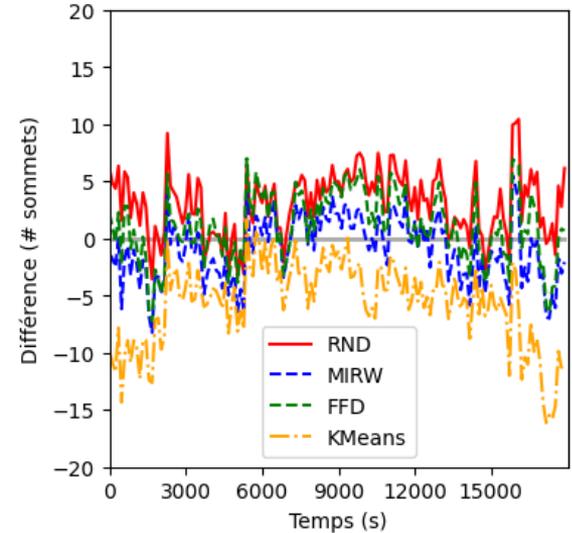
Redondance des chemins ↗



Disparité des chemins ↗



Criticité ↘



IV.4 En résumé

	Robustesse de flux	Coût de routage	Efficiencce réseau	Redondance	Disparité	Criticité	Complexité
Très bon	K-means	MIRW	K-means	RND	RND	K-means	RND
Bon	MIRW	K-means	MIRW	FFD	FFD	MIRW	MIRW
Moyen	RND	RND	FFD	MIRW	MIRW	FFD	FFD
Mauvais	FFD	FFD	RND	K-means	K-means	RND	K-means

Conclusion

Un problème, des solutions (et des compromis)

Fiabilité de l'architecture réseau d'un essaim de nanosatellites

Question : comment fiabiliser un essaim de nanosatellites pour une mission d'interférométrie ?

- Effectuer une division réseau équitable (MIRW, RND)
- Envisager le clustering, mais attention à la complexité de calcul
- Amélioration drastique de la robustesse, donc de la résistance aux pannes
- Pas d'amélioration nette de la résilience : est-ce grave ?

Suite et travaux futurs

- ❑ Recherche d'un nouvel algorithme combinant les avantages de MIRW et k-means
- ❑ Impact de la division sur le long terme (expérimentation)
- ❑ Mise en commun de la recherche sur les essaims : synchronisation, localisation, communication, etc.
- ❑ Utilisation des essaims pour de nouvelles applications : observation de la Terre, monitoring de l'atmosphère, télécommunications d'urgence

Merci de votre attention !



Annexe 1 : paramètres des données

- ❑ Hypothèse 1 : paquets émis en broadcast et en multi-saut
- ❑ Hypothèse 2 : paquets émis sur un lien sont toujours reçus
- ❑ Hypothèse 3 : pondération des arêtes :
 - ❑ distance < 60 km : poids = 4
 - ❑ distance < 30 km : poids = 1

Paramètre	Valeur
Nombre de nanosatellites	50
Fréquence d'échantillonnage	0.1 Hz
Durée d'échantillonnage	27.8 h
Période de révolution	5 h
Portée de connexion	30-60 km

Annexe 2 : évaluation de l'équité de division

Mesure de l'erreur : erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error, RMSE)

$$\text{RMSE}(Y) = \sqrt{\frac{1}{x} \sum_{i=1}^x (y_i - y_0)^2}$$

Paramètre	Valeur
Durée de simulation	5 h
Nombre de sommets	50
Portée de connexion	30-60 km
Nombre de groupes	[1 : 50]
Nombre de répétitions	30

Annexe 3 : métriques de robustesse

❑ Robustesse de flux :
$$F_t(G) = \frac{f_t(G)}{N_G}$$

❑ Coût de routage :
$$R_t(G) = \sum_{u,v \in V_t^2} d(u, v)$$

❑ Efficience réseau :
$$\Theta_t(G) = \frac{1}{2N_G} \sum_{u,v \in V_t^2, u \neq v} \theta(u, v)$$

où
$$\theta(u, v) = \frac{1}{d(u, v)}$$

Annexe 4 : métriques de résilience

❑ Redondance de chemins : $\Psi_t(G) = \frac{1}{2N_G} \sum_{u,v \in V_t^2} |P_{uv}|$

❑ Disparité des chemins : $\Delta_t(G) = \frac{1}{2N_G} \sum_{u,v \in V_t^2} \delta(u, v)$

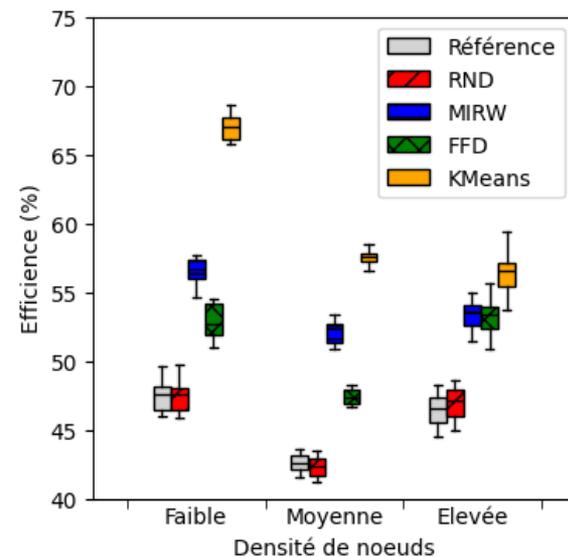
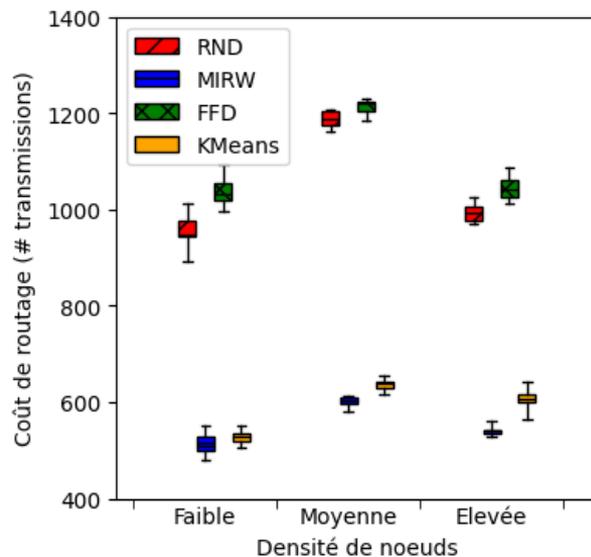
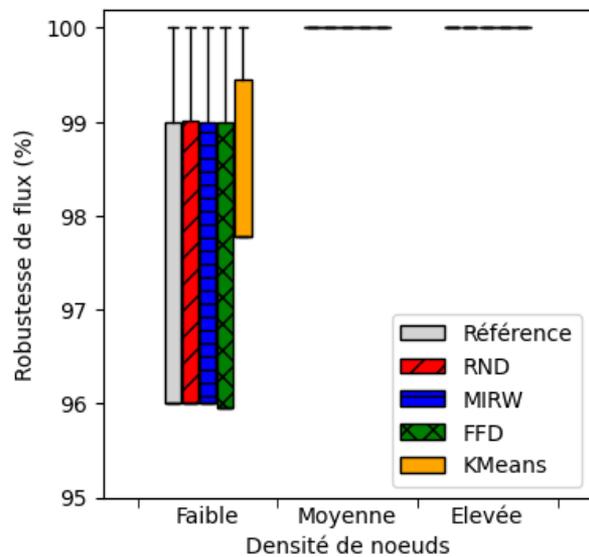
où $\delta(u, v) = \frac{1}{2|P_{uv}|} \sum_{p_i, p_j \in P_{uv}^2} \frac{|p_i(u, v) \oplus p_j(u, v)|}{d(u, v) - 1}$

❑ Criticité des noeuds : $C_t(G) = \{u \in V_t \mid BC_t(u) \geq \epsilon\}$

où

$$BC_t(i) = \frac{1}{2N_G} \sum_{u,v \in V_t^2} \frac{|P_{uv}(i)|}{|P_{uv}|}$$

Annexe 5 : résultats additionnels (robustesse)



Annexe 6 : résultats additionnels (résilience)

