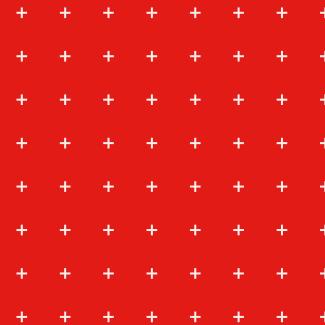




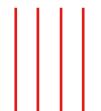
INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
TOULOUSE



Comment fiabiliser des réseaux ad-hoc en essaim

Evelyne AKOPYAN – INSA Toulouse, LAAS-CNRS

evelyne.akopyan@insa-toulouse.fr



LAAS
CNRS

Université
de Toulouse



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

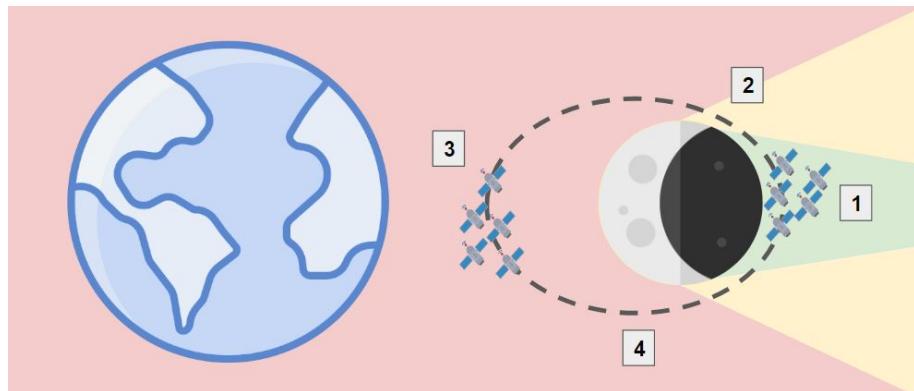
Liberté
Égalité
Fraternité

Les essaims en tant que systèmes spatiaux distribués

Ensemble de (nano)satellites groupés travaillant à un objectif commun

Intérêt : multiplicité des antennes, système distribué

Exemple : radiotélescope spatial distribué en orbite lunaire



Problème : très peu de contrôle sur le système → besoin de fiabilité

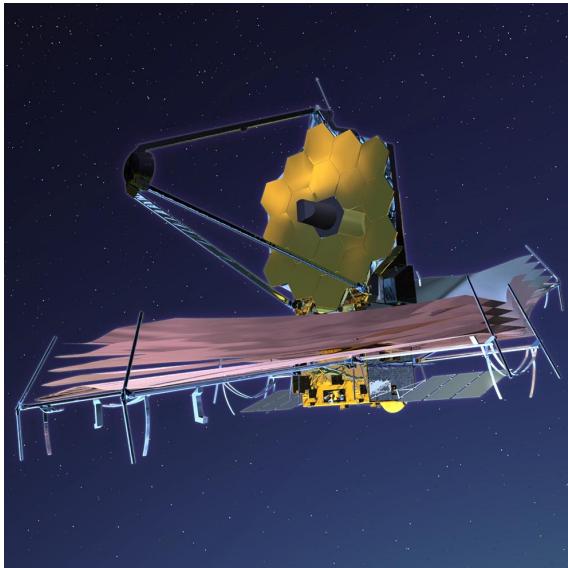


1. Prendre exemple sur l'existant

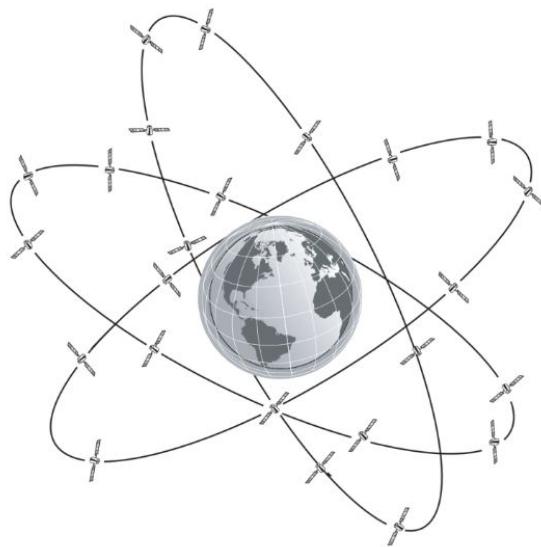
En collaboration avec :

- Riadh DHAOU – Toulouse INP, IRIT
- Emmanuel LOCHIN – ENAC

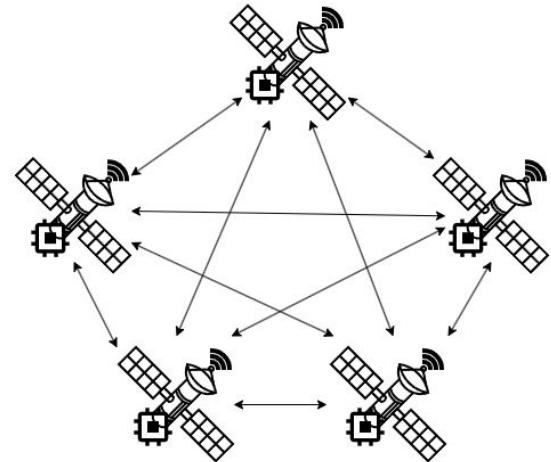
Choix de l'architecture du système



Satellite monolithique
(James Webb)



Constellation (Galileo)

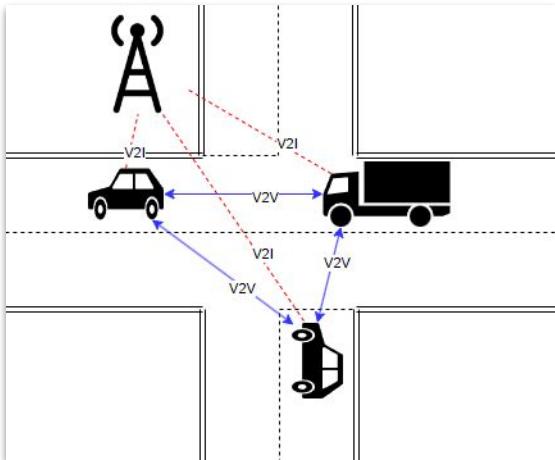


Essaim (NOIRE)

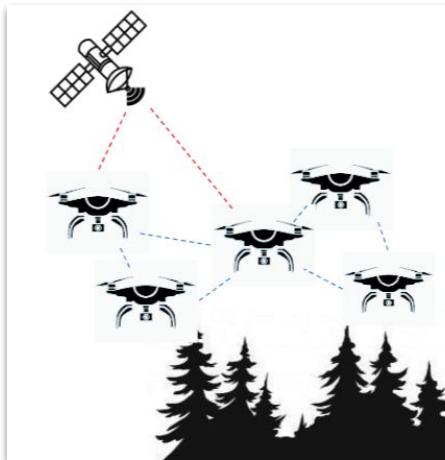


Principe de communication

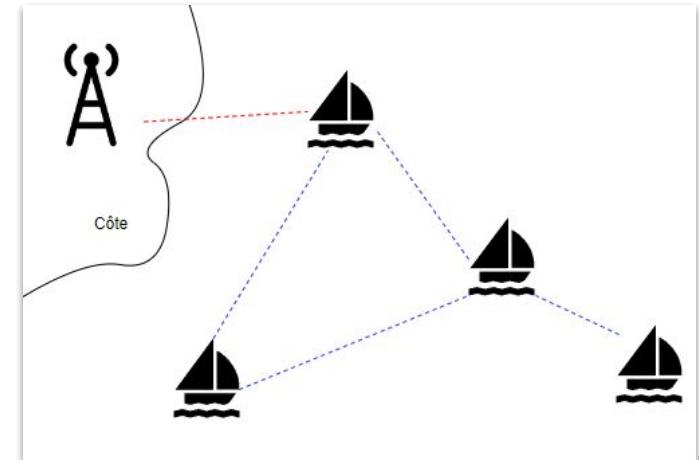
Mobile Ad-hoc Network (MANET) : réseau mobile sans infrastructure dédiée



Réseau routier (VANET)



Réseau de drones (FANET)

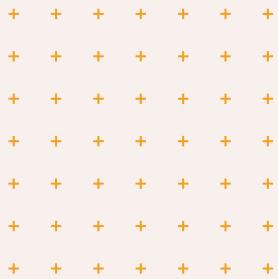


Réseau maritime (SANET)

Techniques de fiabilisation

- Mécanismes d'économie d'énergie, optimisation des trajets
- Contrôle de congestion, répartition de la charge
- Mise en place de chemins alternatifs

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



2. Diviser pour mieux régner

En collaboration avec :

- Riadh DHAOU – Toulouse INP, IRIT
- Emmanuel LOCHIN – ENAC

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*



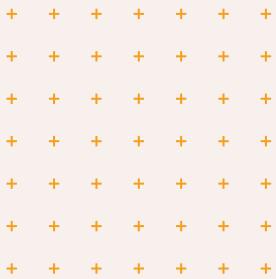
NTN Days 2025



Impact du clustering sur le système

- Résultat connu : le clustering permet de réduire la charge du réseau
 - Fonctionne pour les réseaux terrestres et non terrestres
- 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



3. La division équitable

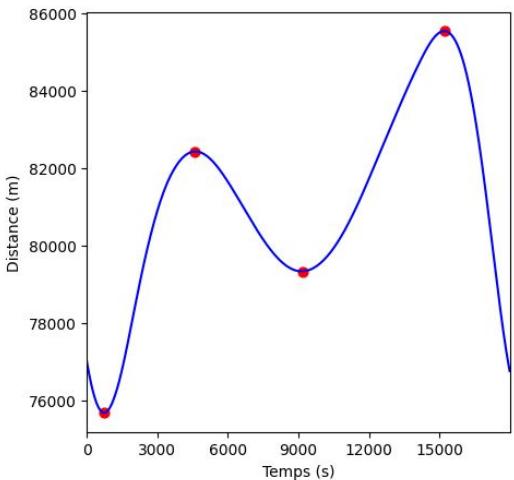
En collaboration avec :

- Riadh DHAOU – Toulouse INP, IRIT
- Emmanuel LOCHIN – ENAC

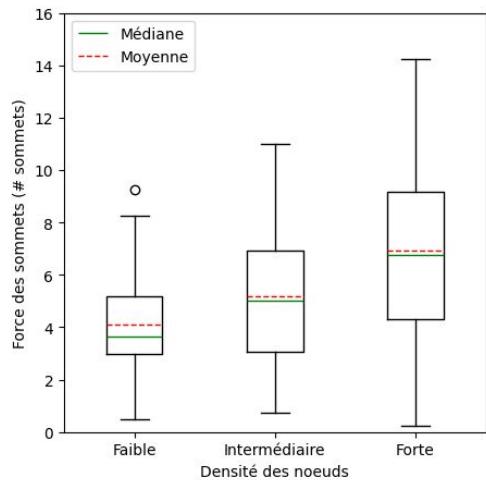
Propriétés du réseau de l'essaim

Système fortement hétérogène !

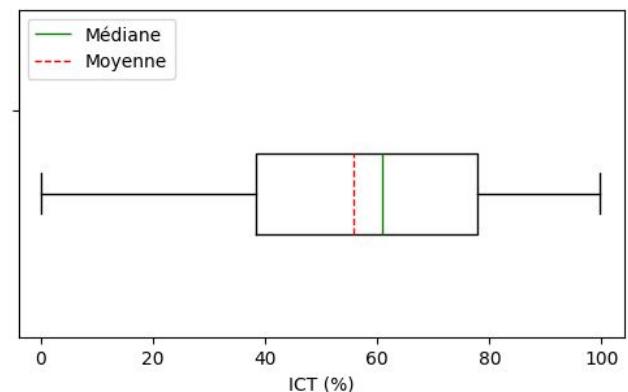
Distance relative des satellites



Densité des satellites



Disponibilité des liens inter-satellites



Comment obtenir une division équitable

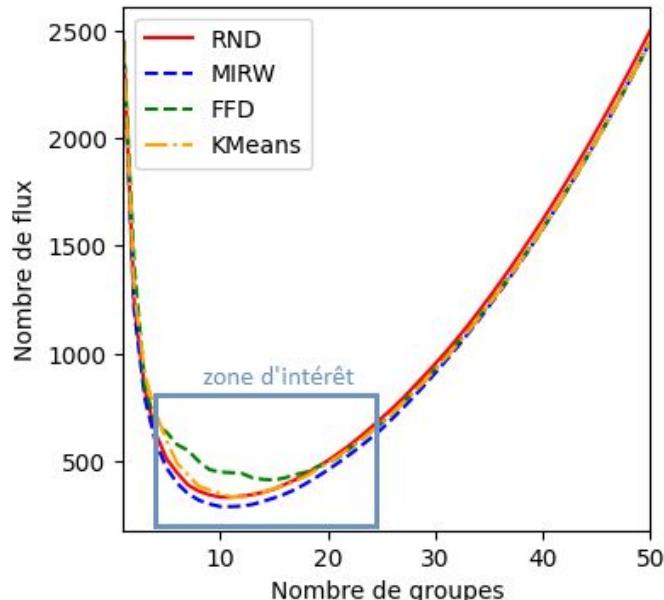
Division de graphe : agréger des entités de sorte à ce que les groupes formés soient similaires

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)

Performances des algorithmes

- Distribution équitable du nombre de noeuds par groupe : **MIRW** (garantie de faire des groupes de même taille)
- Préservation des propriétés du réseau : **RND** (groupes similaires au graphe de référence)
- Limitation de la consommation énergétique : **MIRW** (divise par 10 le nombre de paquets à transmettre)





4. Le concept de fiabilité réseau

En collaboration avec :

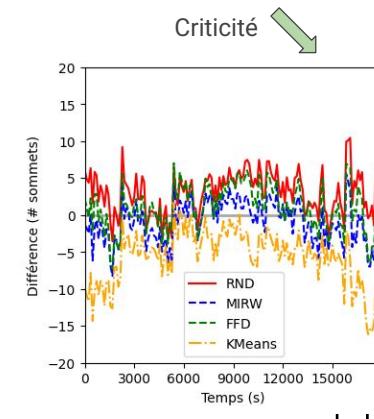
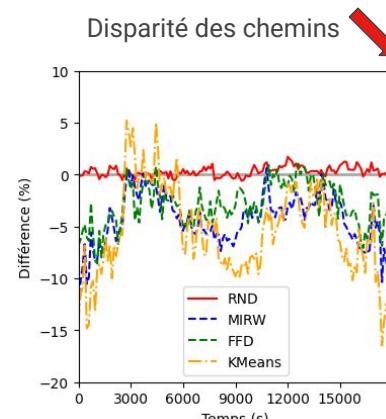
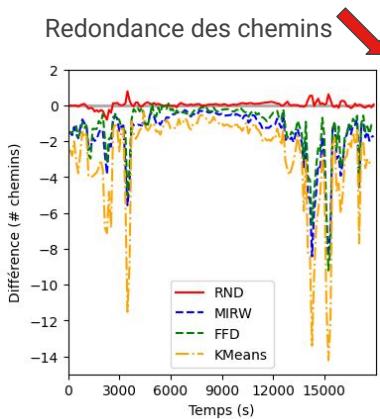
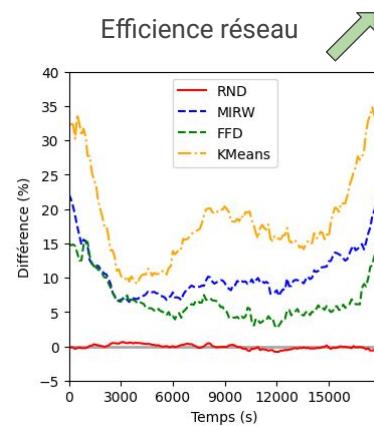
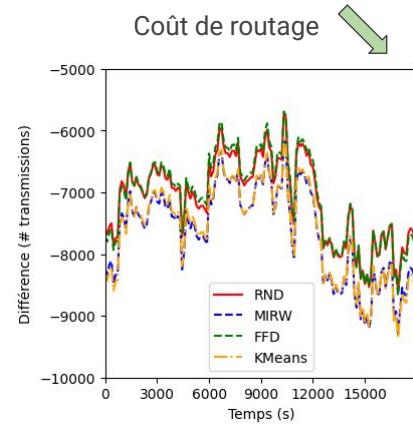
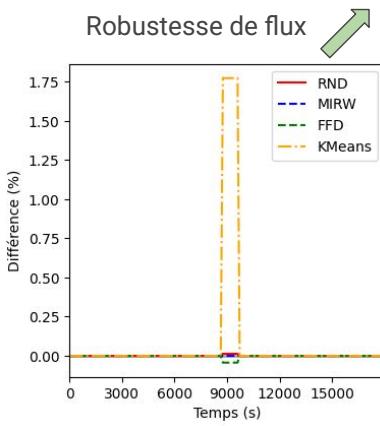
- Riadh DHAOU – Toulouse INP, IRIT
- Emmanuel LOCHIN – ENAC
- Juan A. FRAIRE – INRIA Lyon

Définition et évaluation de la fiabilité réseau

- Robustesse : capacité d'un système à résister aux pannes, ou à les éviter
Métriques : robustesse de flux, coût de routage, efficience réseau
- Résilience : capacité d'un système à maintenir un niveau de fonctionnement malgré la présence de pannes
Métriques : redondance et disparité des chemins, présence de noeuds critiques

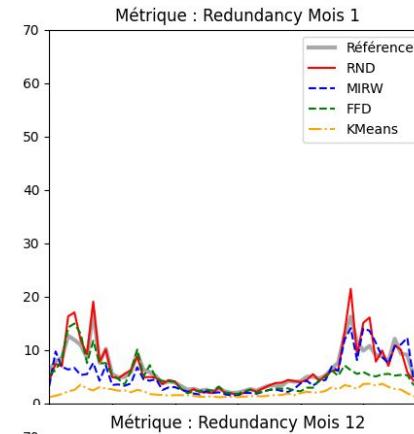
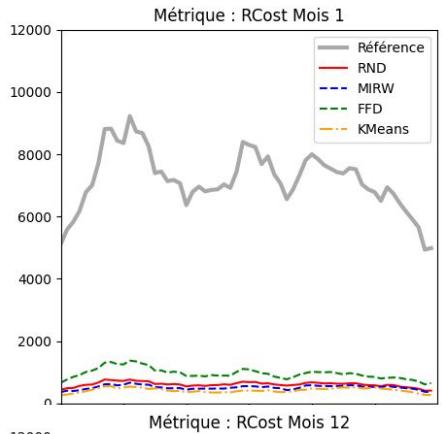
Fiabilité : capacité d'un système à prévenir et tolérer les pannes

Impact de la division à court terme (1 jour)

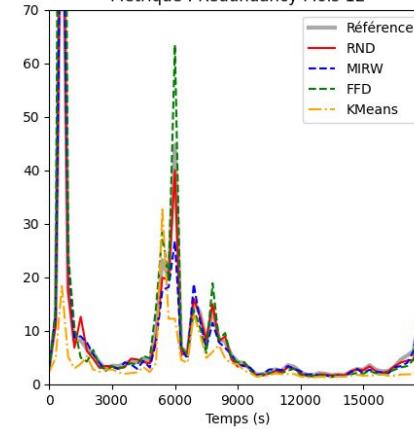
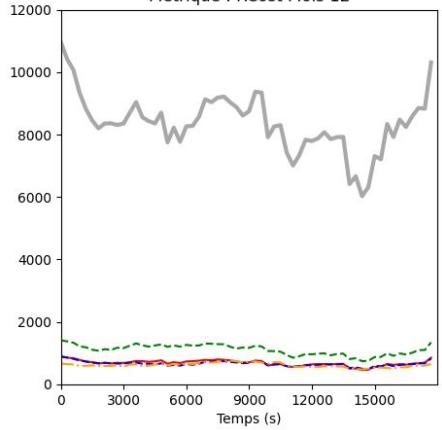


Impact de la division à long terme

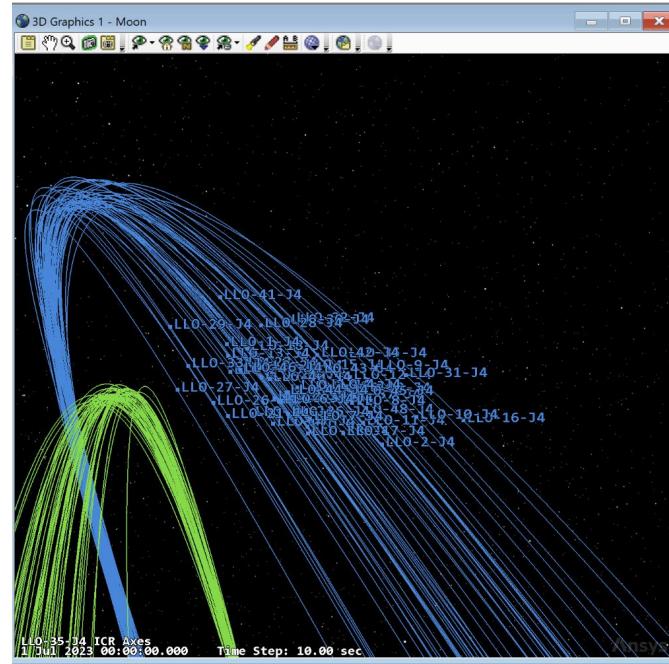
Au lancement



Après 1 an



Quel est le problème ?



Conclusion

Comment fiabiliser un essaim de nanosatellites pour une mission spatiale ?

- Effectuer une division réseau équitable (MIRW)
- Amélioration drastique de la robustesse
- Pas d'amélioration nette de la résilience : est-ce grave ?
- Prolongation de la durée de vie du système

Merci de votre attention !

Contact : evelyne.akopyan@insa-toulouse.fr