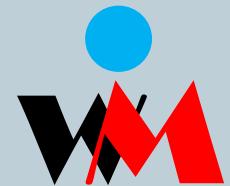


Workshop: Process and Challenge in Non-Terrestiral Networks

Bordeaux 2 juin 2025

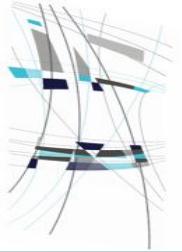


WARM-M2M



**WAveform and Resource Management
for M2M over large areas**

Project Funding: ANR-24-CE25-2514
Web site: <https://warm-m2m.univ-ubs.fr/>



Projet ANR PRCE 2024

- Partenaires :

**INSA**INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON**THALES**

Maxime Guillaud
Jean-Marie Gorce
Kassem Saied
(PostDoc)

Emmanuel Boutillon
Cédric Marchand
Samya Tannir (PhD)

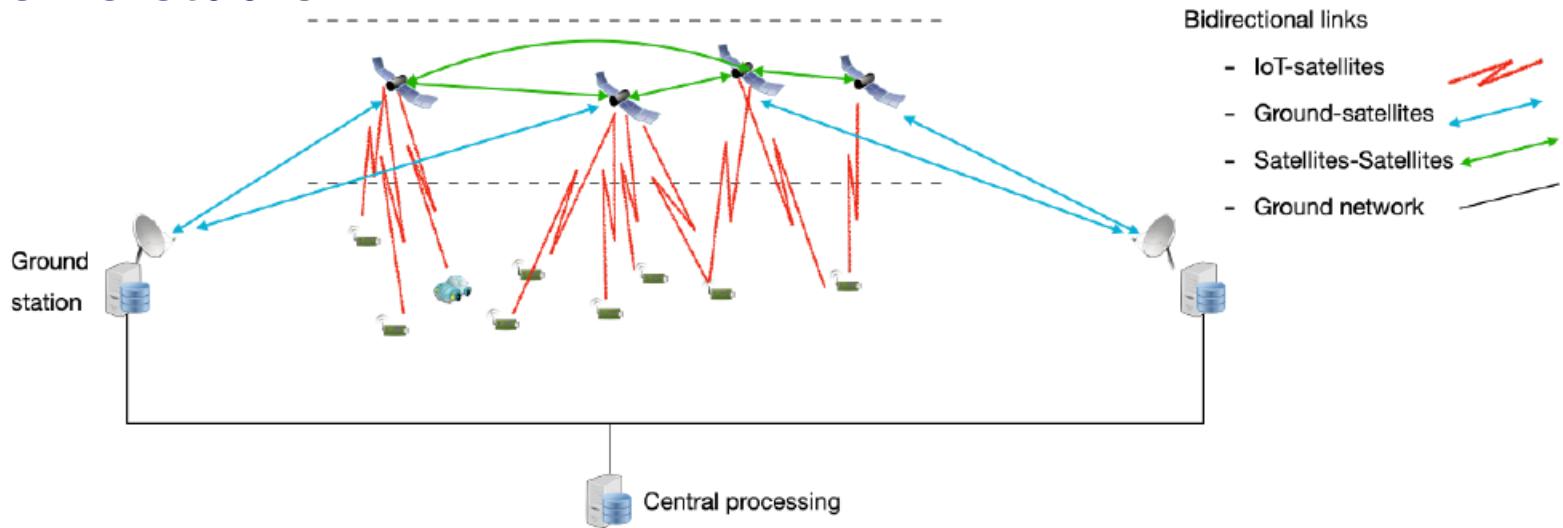
Christophe Le Martret
Xavier Leturc

Lou Salaun
Calvin Chen
Stagiaire

- Durée : novembre 2024-octobre 2028

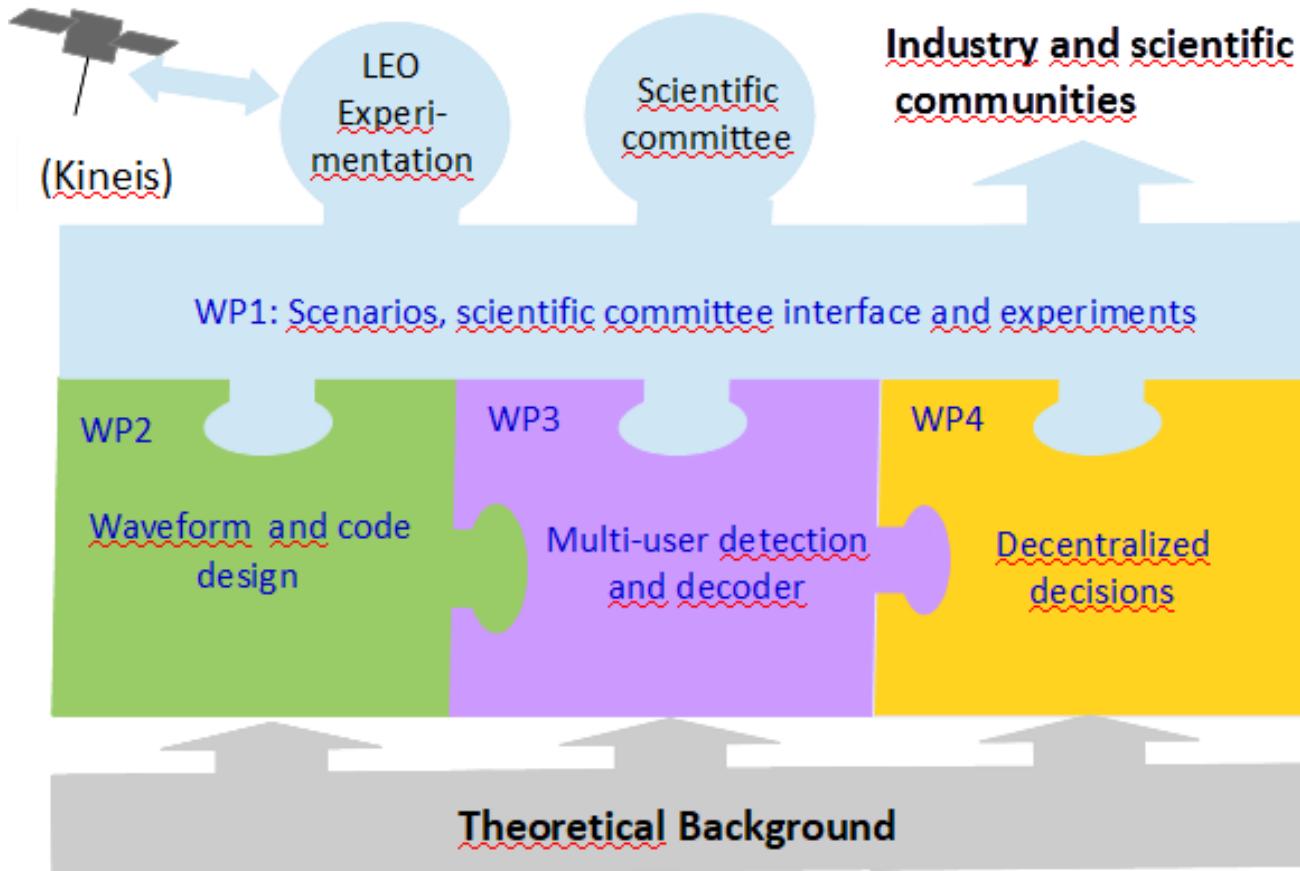
Problématique de WARM-M2M

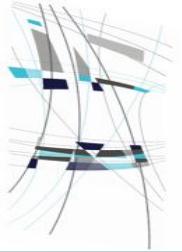
- Système étudié



- Objectif : Permettre à des milliers de capteurs de transmettre sporadiquement de petits paquets à travers un réseau satellitaire avec un minimum de coordination et de voie retour.
- Positionnement : Recherche amont.

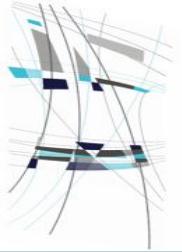
Quelle science dans WARM-M2M ?





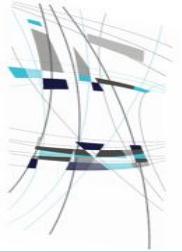
WP2 : waveform and code design

- Points de départ :
 - Modulation QCSP : Concaténation code correcteur d'erreur q-aire avec modulation orthogonale q-aire (UBS)
 - Modulation tensorielle (INSA-Lyon)
- Point d'arrivée : modulations optimisées adaptées à la détection multi-utilisateurs.



WP2 : trames QCSP

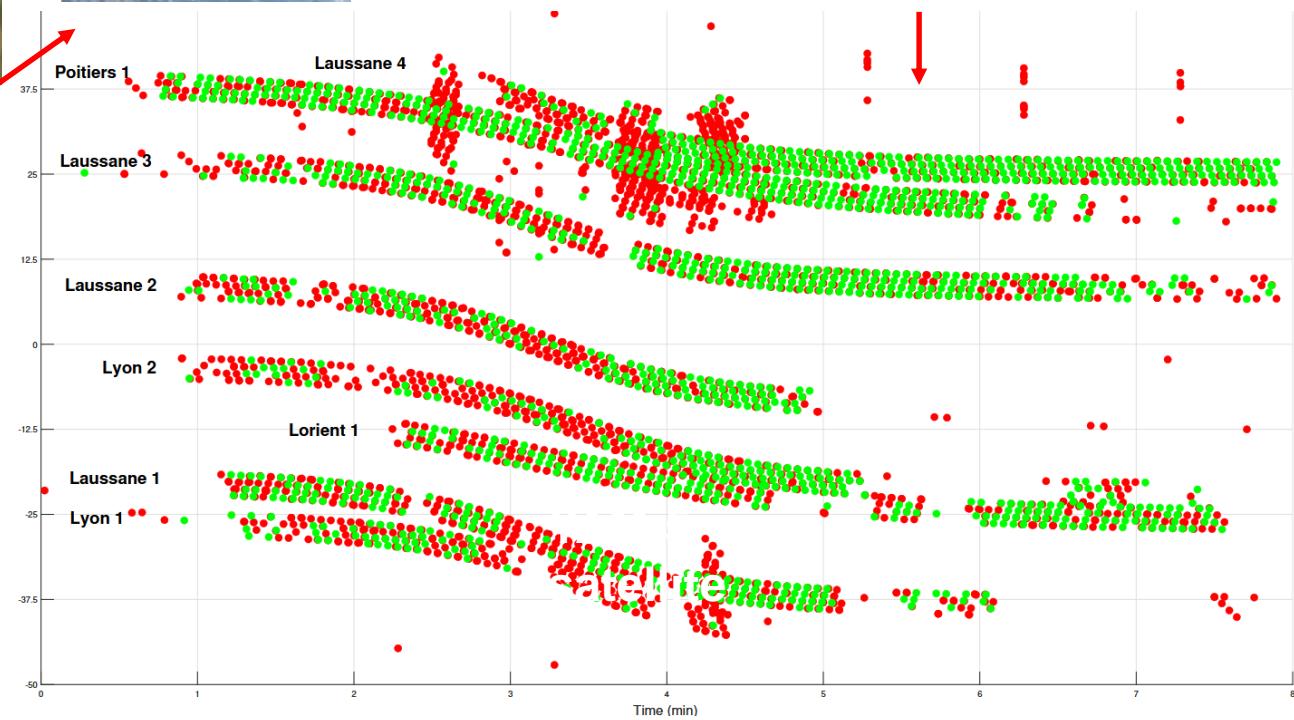
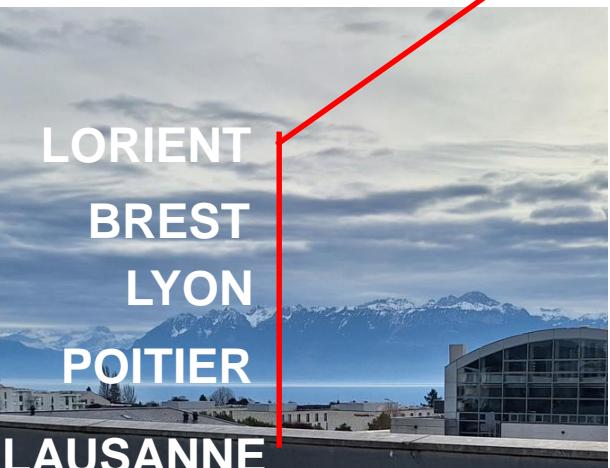
- Trames QCSP (ANR 2019-2023) : voir présentation des journées NTN des 17-18 octobre de Grenoble.
- Trames avec un code correcteurs d'erreur sur GF(64) et une modulation q-aire à 64 états et **sans préambule**.
- Projet CNES ADONIS (KINEIS, CEA, UBS) :
 - Développement algorithme MU SIC non-coordonné (unslotted aloha) pour le canal LEO
 - Efficacité spectrale agrégée de 0.62 bit/Hz/s obtenues
 - Preuve de concept par mesure avec satellite LEO.



WP2 : trames QCSP

- Statut du travail
 - Amélioration algorithme de détection MU pour des trames QCSP
 - Simplification décodeur code polaire non binaire (souplesse en terme de rendement de codage).
- Travaux futurs:
 - Nouvelles modulations (par ex: LORA).
 - Ajout de préambule pour simplifier la détection.

Amélioration détection



- ADONIS (2023): 1462 trames décodées
- WARM (06/2025): 2263 trames décodées⁸

Modulation multi-linéaire par un exemple

Message de (01 10 01 11 10)

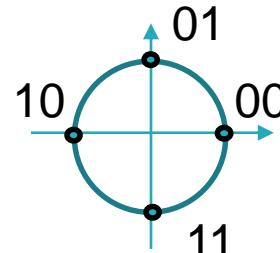
Mapping

Ensemble de 3 vecteurs

$$A_1 = (+1, +j, -1) \quad T_1 = 3$$

$$A_2 = (+1, +j, -j) \quad T_2 = 3$$

$$A_3 = (+1, -1) \quad T_3 = 2$$



Constellation C

Mapping: 00 => +1
01 => +j
10 => -1
11 => -j

Modulation multi-linéaire (tensorielle)

$$A_1 \otimes A_2 \otimes A_3$$

1

$$2 \downarrow \begin{bmatrix} (+1)(+1)(+1) & (+j)(+1)(+1) & (-1)(+1)(+1) \\ (+1)(+j)(+1) & (+j)(+j)(+1) & (-1)(+j)(+1) \\ (+1)(-j)(+1) & (+j)(-j)(+1) & (-1)(-j)(+1) \end{bmatrix}$$

$$3 \downarrow \begin{bmatrix} (+1)(+1)(-1) & (+j)(+1)(-1) & (-1)(+1)(-1) \\ (+1)(+j)(-1) & (+j)(+j)(-1) & (-1)(+j)(-1) \\ (+1)(-j)(-1) & (+j)(-j)(-1) & (-1)(-j)(-1) \end{bmatrix}$$

Tenseur (ou matrice 3x3x2) de rang 1

$$M = (1, j, -1, 1, -1, -j, -j, 1, j, -1, -j, 1, -1, 1, j, j, -1, -j)$$

Taille vecteur : 18 symboles

$$\text{Efficacité spectrale} = \frac{5 \times 2}{18} = \frac{5}{9} \text{ bit/Hz/s}$$



Modulation multi-linéaire (ou tensorielle).

Message de
 $\sum_{k=1}^D (T_k - 1) \log_2(C)$ bits

Constellation C

Mapping

Ensemble de N vecteurs
 (A_1, A_2, \dots, A_D) de tailles
 (T_1, T_2, \dots, T_D)
avec $A_k = (+1, a_k(2), a_k(3), \dots, a_k(T_k)) \in \mathcal{C}^{T_d}$

Efficacité spectrale

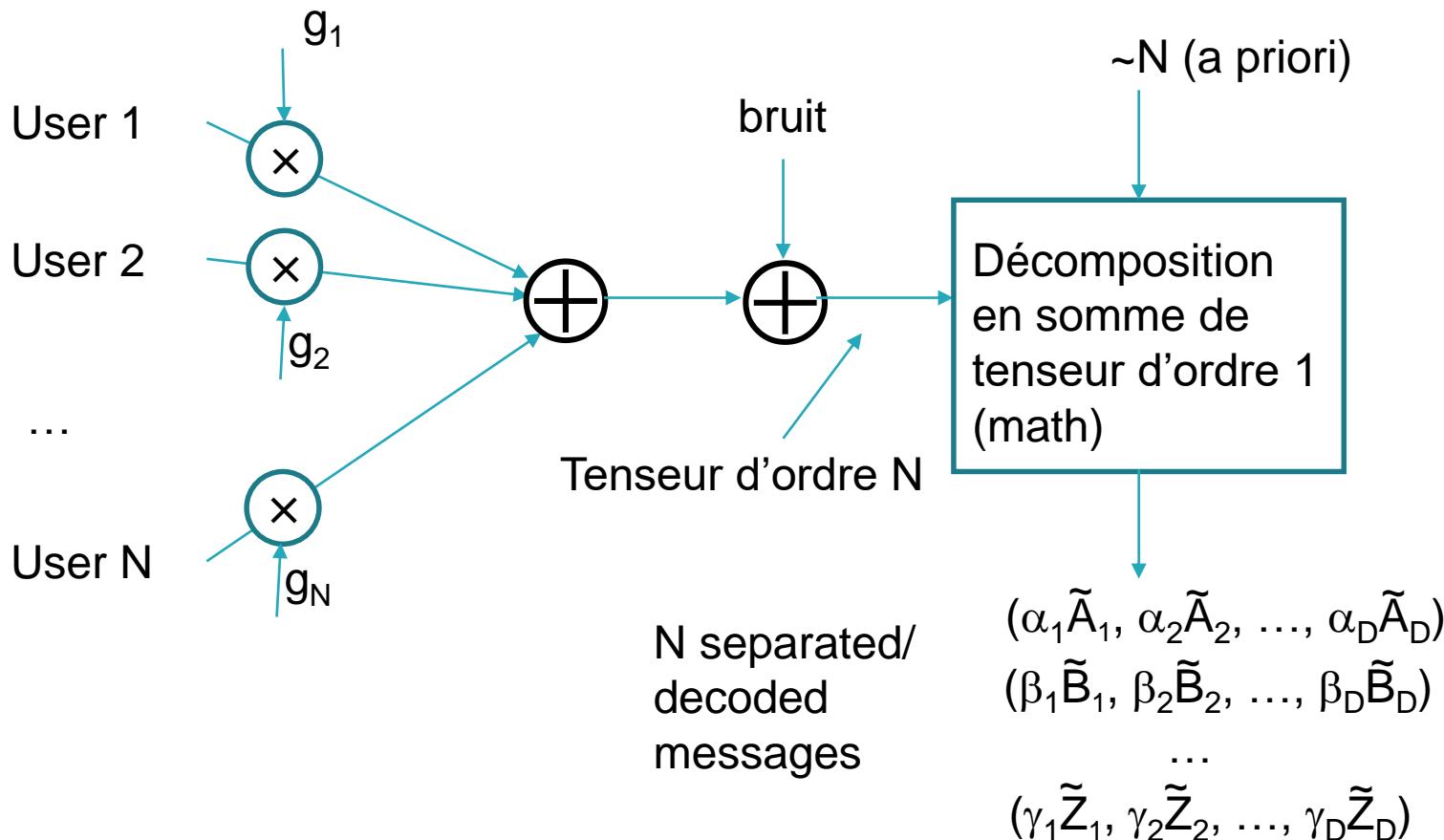
$$\frac{\sum_{k=1}^N (T_k - 1)}{\prod_{k=1}^N T_k} \log_2(C) \text{ bit/Hz/s}$$

Modulation multi-linéaire
(tensorielle)

Tenseur $A_1 \otimes A_2 \otimes \dots \otimes A_D$ de taille $(T_1 \times T_2 \times \dots \times T_D)$ de rang 1

Mise à plat du tenseur => message M de taille : $\prod_{k=1}^D T_k$

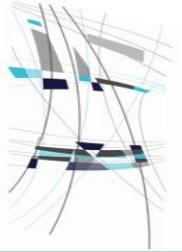
Detection multi-utilisateurs (synchro)



Beauté de cette technique :

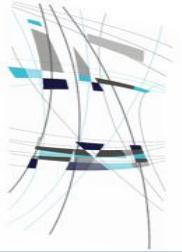
Décodage et séparation de source nativement conjoint.

Nombre d'utilisateurs séparables croit très rapidement.



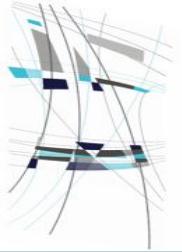
Tenseurs et WARM-M2M

- Verrou 1 : est-il possible de supporter l'asynchronisme pour faire de l'ALOHA non slotté ?
- Verrou 2 : est-il possible de supporter le chirp induit par la variation du Doppler entre le début et la fin du message.
- Verrou 3 : Est-il possible d'ajouter un code correcteur d'erreur externe pour aider la détection/synchronisation et la séparation MU.
- Statut des travaux : Post-doc (Kassem Saeid) recruté à l'INSA de Lyon depuis février 2025.
=> État de l'art, développement (en python) des algorithmes.



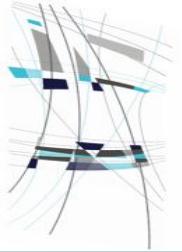
WP3 : Multiuser detection and decoder

- Joint Active User Detection and Channel Estimation (AUDaCE)
Go behind Successive Interference Cancellation using Message Passing Algorithms (MPA).
Downsides: Require a priori knowledge (channel, activity probability distributions of devices) and does not always converge.
- Short term goals
 - Develop a Graph Neural Networks (GNN) to solve the problem when MPA cannot
 - Compare GNN, MPA, and MPA+GNN (combination of deep learning and classical optimization methods)
- Progress status
 - With an internship: review of literature, and ongoing implementing a first GNN in PyTorch



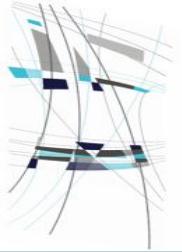
WP4 : Decision décentralisée

- Utilisation d'outils de re-enforcement learning pour optimiser le protocole d'accès Cloud-RAN avec voie de retour "rare".
- Etat des travaux :
 - Modélisation du canal NTN (5G et générique)
 - Reproduction de l'état de l'art sur les techniques IRSA (Irregular Repetition Slotted Aloha).



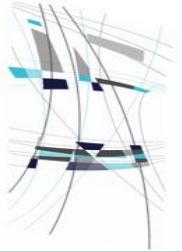
WP1 : Scenarios, scientific committee interface and experiments

- Comité scientifique (2 réunions 11/2025 et 11/2027)
 - **Philippe Sehier** (NOKIA), expert in 5G standardization;
 - **Nicolas Chuberre** (Thales Alenia Space), lead representative of THALES in 3GPP TSG RAN and rapporteur of the standardization on satellite in 5G, vice Chair of the Technical Committee Satellite Earth Stations & systems (ETSI);
 - **Vincent Deslande** (KINEIS), strategic project manager,
 - **Gianluigi Liva** (DLR, Germany), Information Transmission Group Leader
 - **Petar Popovski** (Aalborg University), full professor, ERC Consolidator Grant awardee (2015-2020), Chair of the IEEE Communication Theory Technical Committee.
 - **Sonia Cazalens** (CNES).
- Objectif réunion 1 : discuter orientations/risque/opportunité à $T_0 + 12$.
- Objectif réunion 2 : diffuser les résultats, préparer l'après WARM-M2M à $T_0 + 36$.



WP1 : Scenarios, scientific committee interface and experiments

- Réalisation d'une experimentation communication LEO (avec l'aide de KINEIS) pour valider/obtenir une preuve de concept du système dans son ensemble.



Conclusion

- Un projet encore à ses débuts, avec des perspectives intéressantes.
- Philosophie ANR d'accès libre aux données et aux logiciels.
- Site WEB : <https://warm-m2m.univ-ubs.fr/organization/>
- ...J'espère pouvoir vous presenter de nouveaux résultats lors de la prochaine journée NTN.