

## Dépasser l'observation mono-mission de la Terre

### Utiliser le paradigme multi-agents pour fédérer de multiples missions

J.-L. Farges<sup>1</sup>   F. Perotto<sup>1</sup>   **Gauthier Picard<sup>1</sup>**   C. Pralet<sup>1</sup>

C. de Lussy<sup>2</sup>   J. Guerra<sup>2</sup>   Ph. Pavero<sup>2</sup>   F. Planchou<sup>2</sup>

Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle (APIA@PFIA'24)

<sup>1</sup> ONERA/DTIS, Université de Toulouse

<sup>2</sup> Airbus Defence and Space

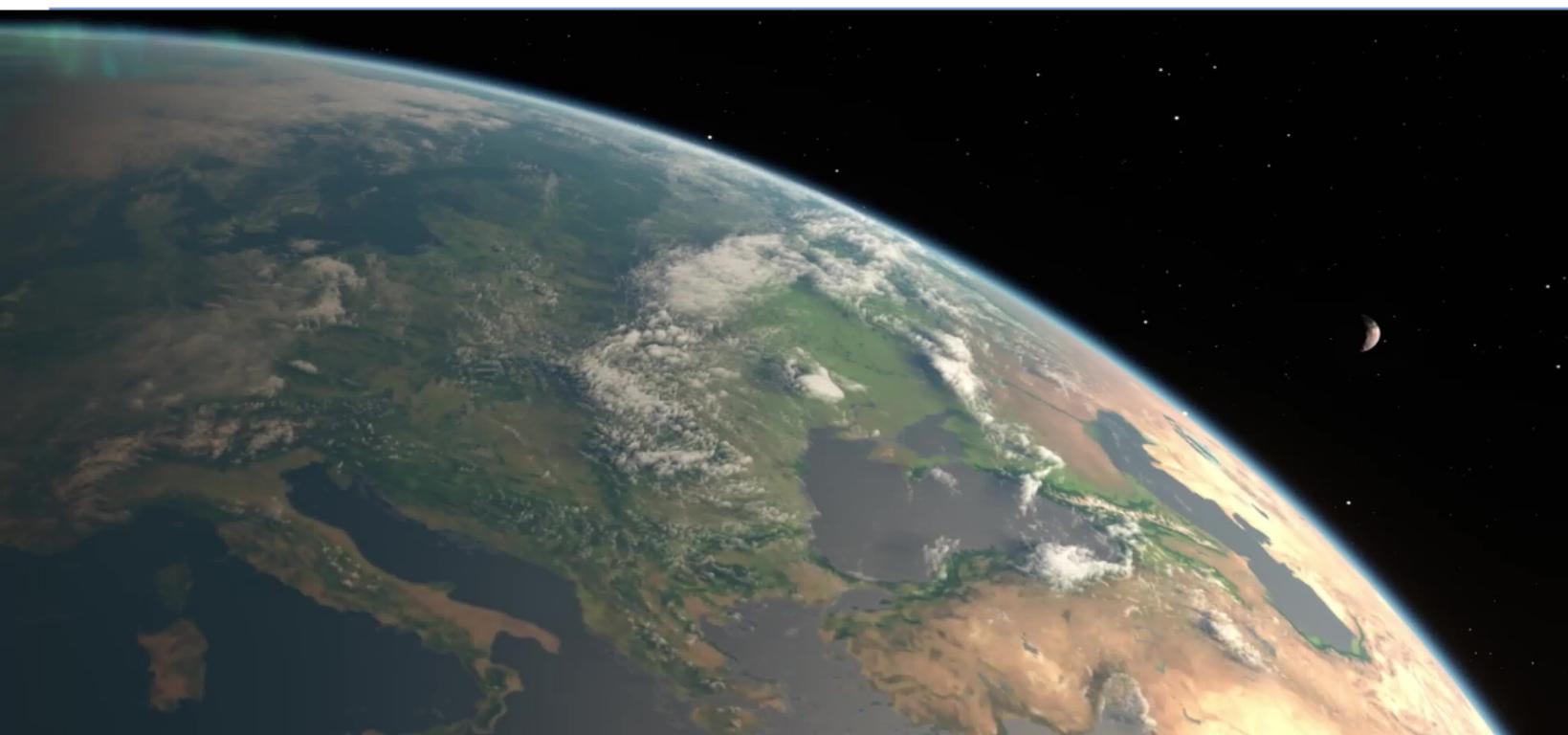
- 
- A large, semi-transparent white rectangular box is positioned in the center-right area of the image, containing four numbered items.
- ① Qu'est-ce qu'une fédération EOS ?
  - ② Observations fédérées
  - ③ Communications fédérées
  - ④ Synthèse

# Evolution des écosystèmes d'observation de la Terre

- Des instruments et des satellites plus avancés
- Des besoins croissants pour une plus grande réactivité  
[EUSPA, 2022]
- e.g, la surveillance, la réponse aux catastrophes
- De la mission unique à la mission multiple
- Segment sol en tant que service (GSaaS)



# Étude de cas : Acquisition réactive de grandes zones



# Étude de cas : Acquisition réactive de grandes zones

- Optimize acquisition time of large areas
- Optimize download time of acquisitions

# Étude de cas : Acquisition réactive de grandes zones

- Optimize acquisition time of large areas
  - Optimize download time of acquisitions
- ⇒ Multiple missions and ground stations

# Approche conventionnelle de la demande de services EO

---



Client 1



Client 2



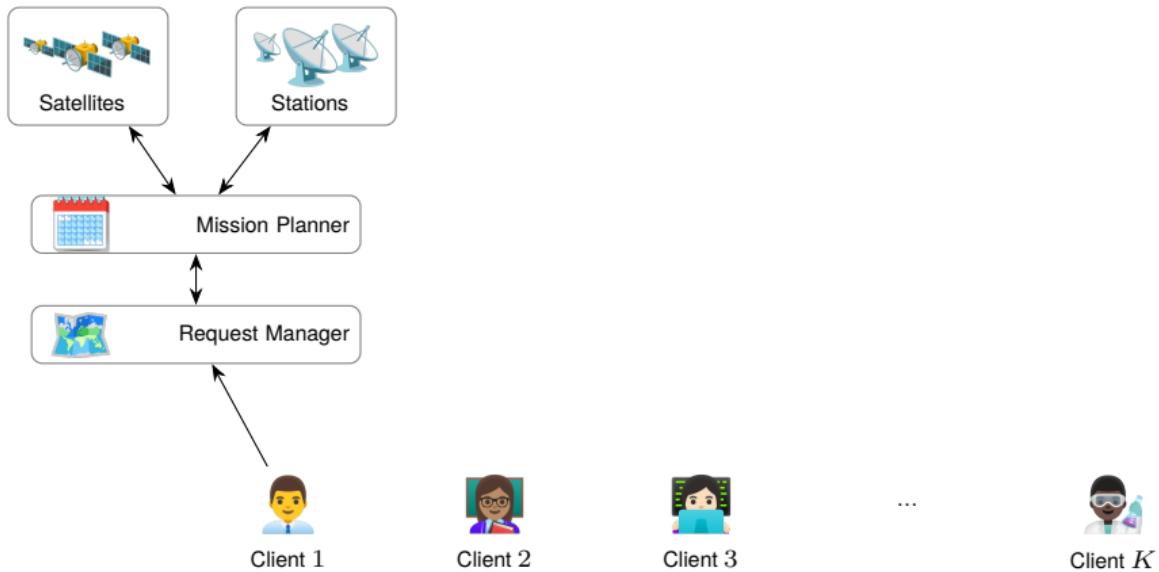
Client 3

...

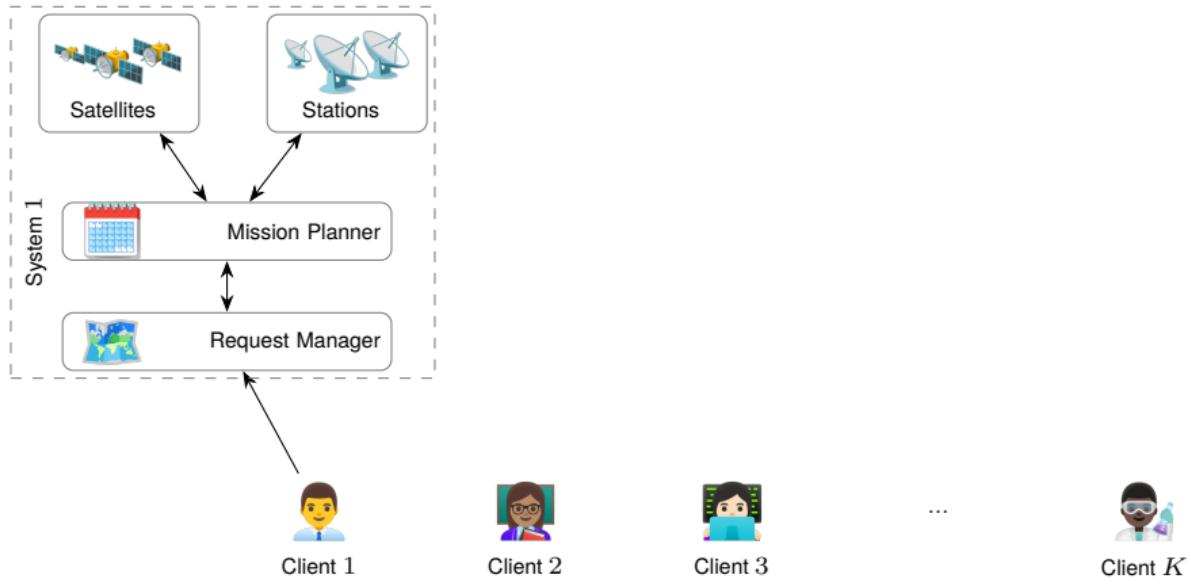


Client  $K$

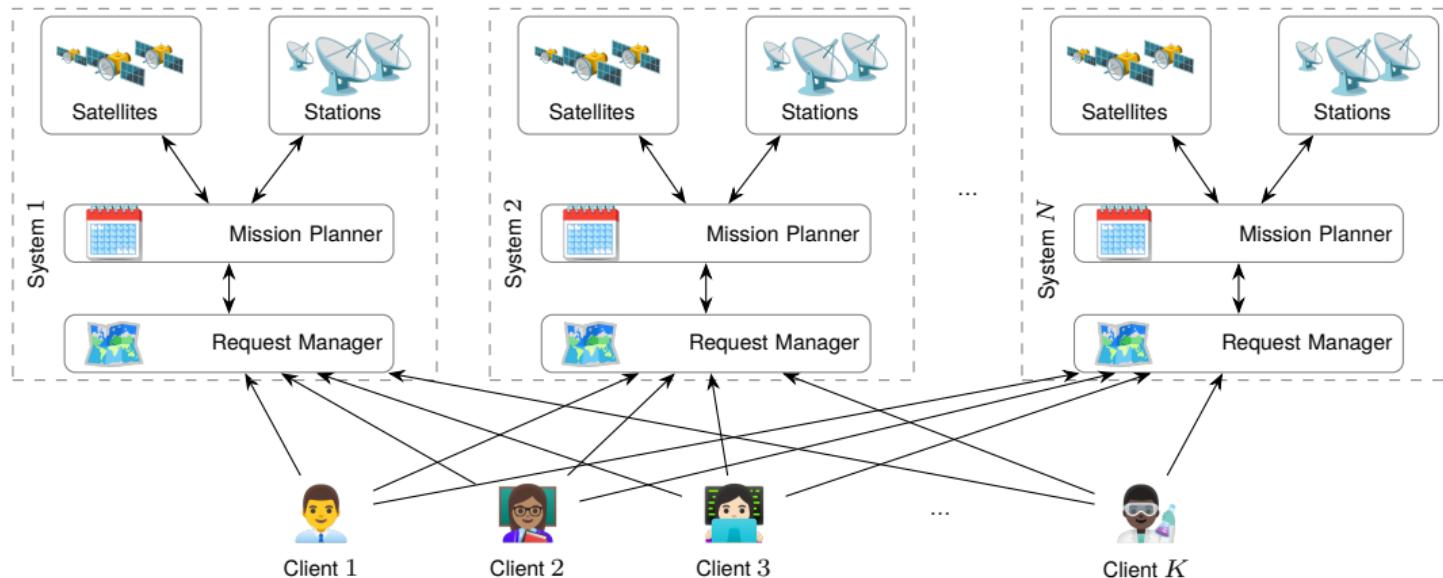
# Approche conventionnelle de la demande de services EO



# Approche conventionnelle de la demande de services EO

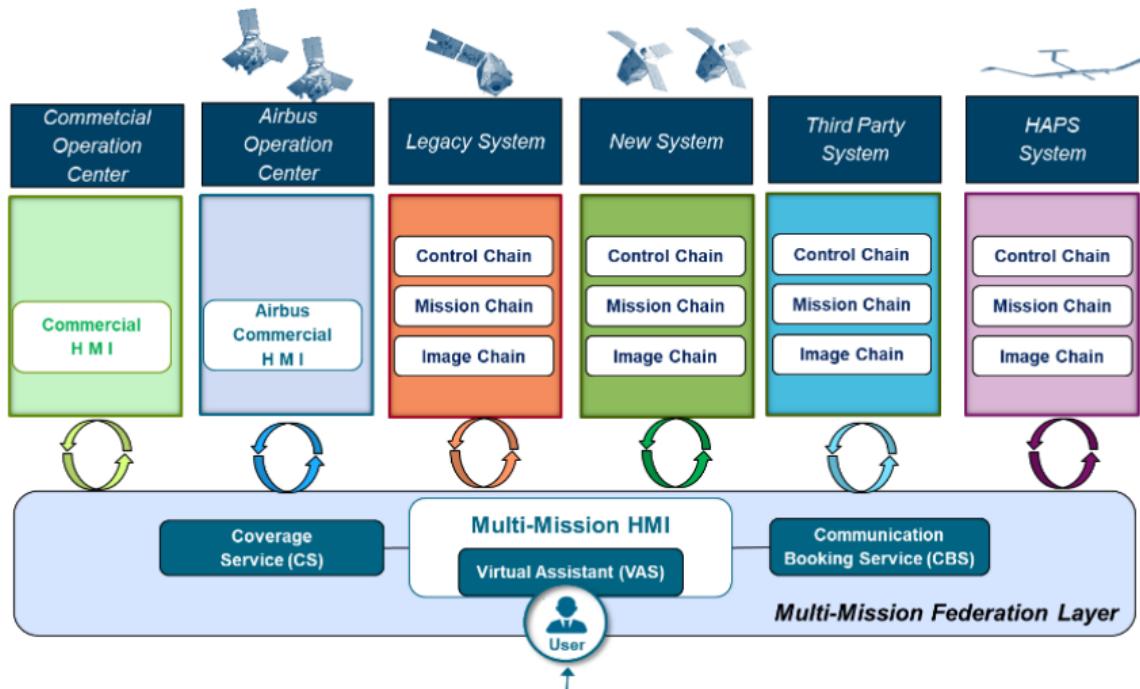


# Approche conventionnelle de la demande de services EO



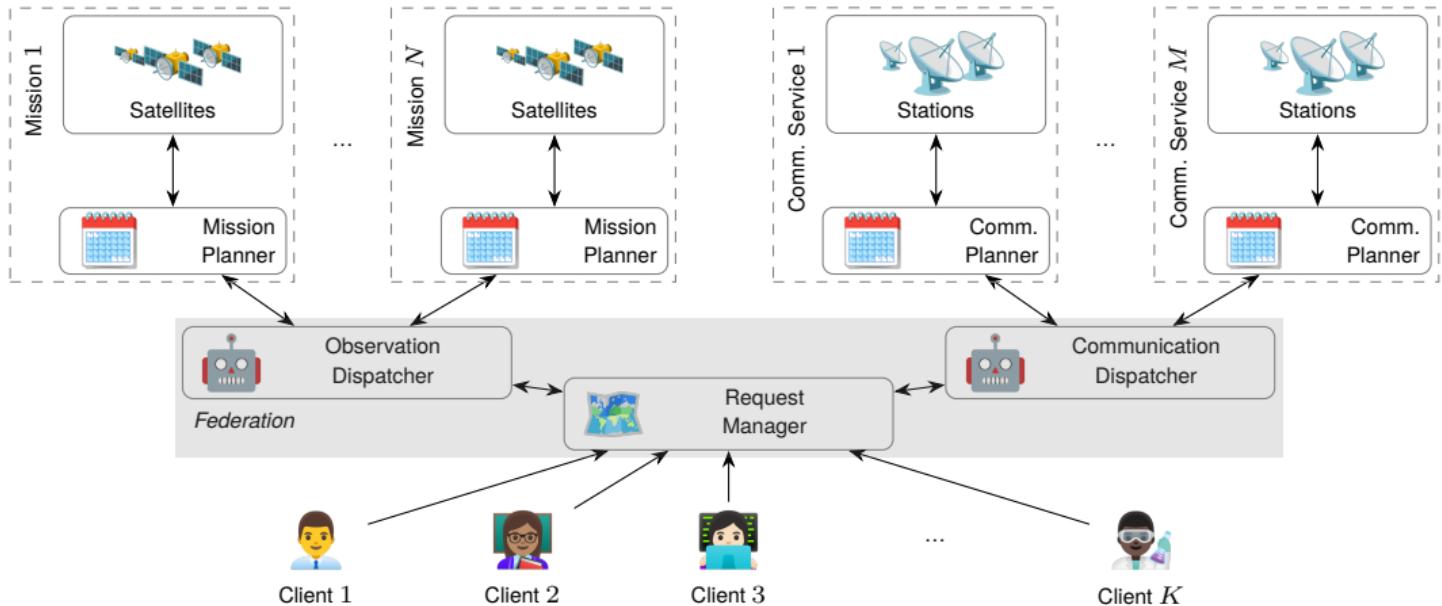
# Approche DOMINO-E

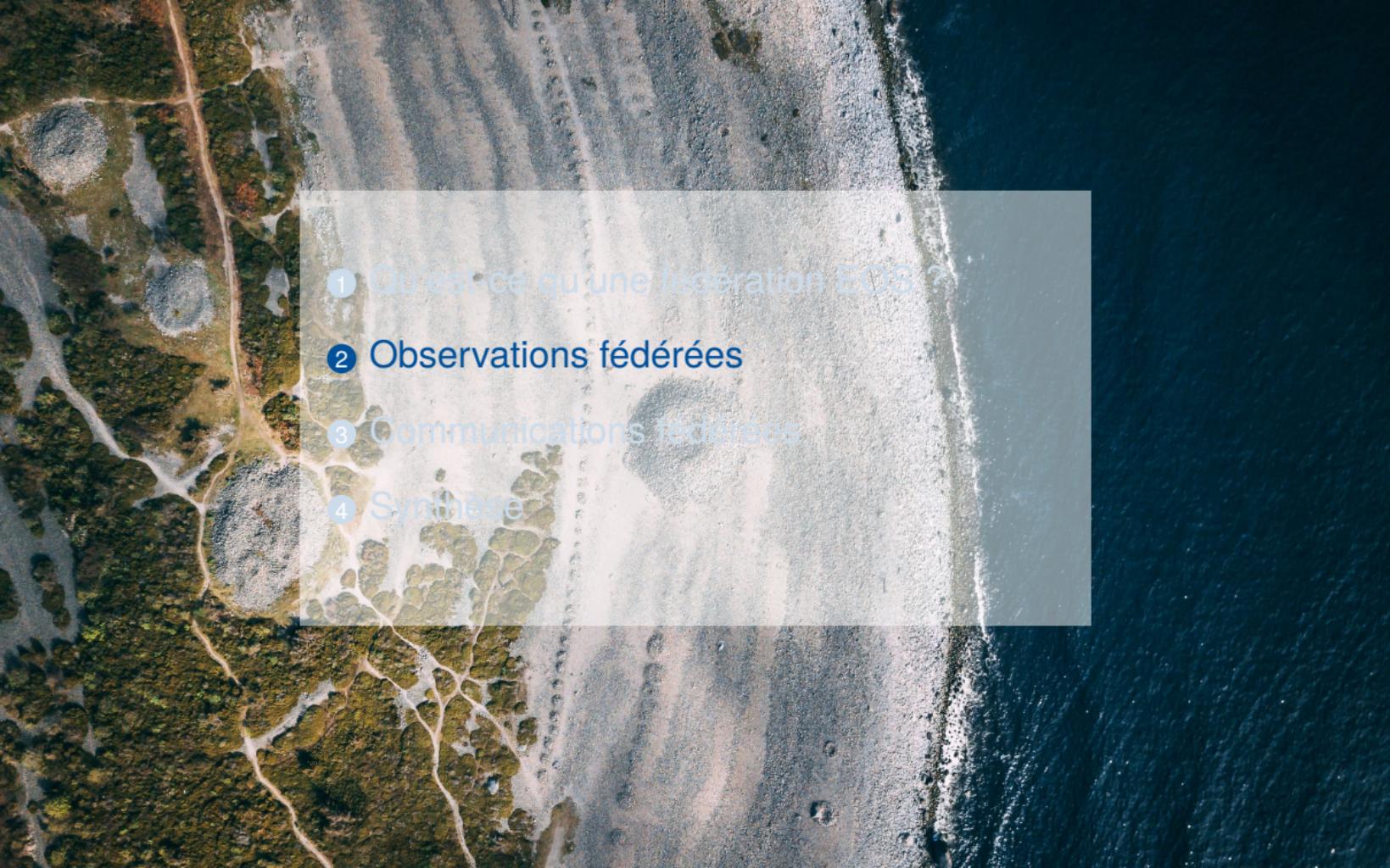
Ajouter une couche de fédération pour coordonner plusieurs systèmes



# Approche DOMINO-E (cont.)

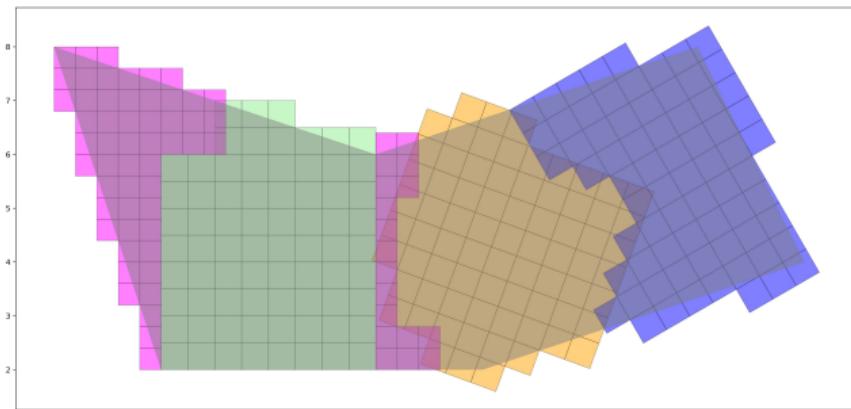
Ajouter une couche de fédération pour coordonner plusieurs systèmes



- 
- A white rectangular overlay box is positioned in the center of the image, containing four numbered steps. The background shows a coastal area with green land, a dirt path, and a rocky beach meeting the ocean.
- ① Qu'est-ce qu'une fédération EDF ?
  - ② Observations fédérées
  - ③ Communications fédérées
  - ④ Synthèse

# Observations fédérées

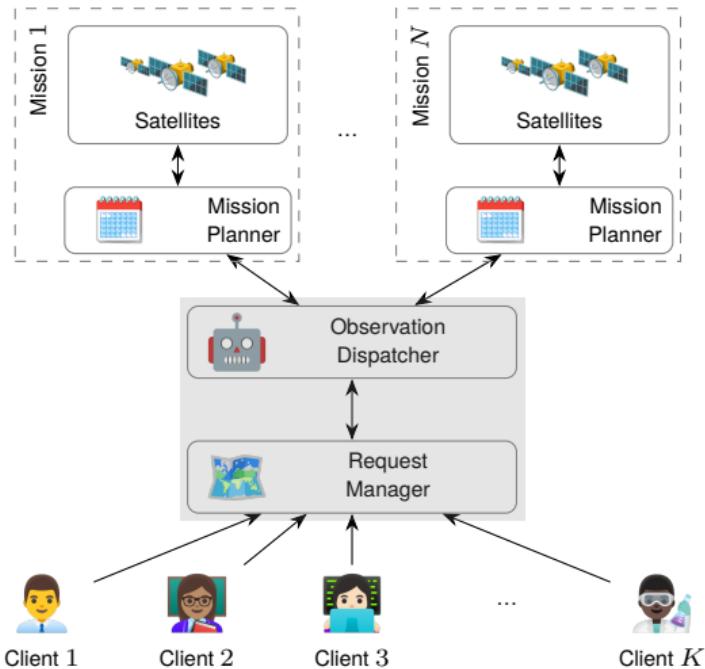
*"Comment diviser une grande zone et attribuer ces subdivisions à différentes missions afin de minimiser le temps d'acquisition et de maximiser la qualité des images, même si nous ne connaissons pas la charge de travail future des missions ?"*



# Observations fédérées

## Composition du système

- $K$  utilisateurs, ou *clients*, qui demandent des images sur de vastes zones de la surface de la Terre
- $N$  agents d'observation, ou *missions* avec leur propre *planificateur*
- **Objectif** = effectuer les observations demandées par les  $K$  clients en utilisant les  $N$  missions d'observation disponibles
- Répartir les tâches d'observation entre les missions et fusionner les résultats
- Accès transparent à de nombreuses ressources sans avoir à se soucier des détails



# Observations fédérées

Décisions multi-agents et interactions

## Négociation multi-agents [KRAUS, 2001]

- Envoyer des demandes de sous-zones aux missions (qui peuvent les accepter ou les rejeter)
  - Chaque sous-zone est attribuée à une mission spécifique
- ⚠ Le temps de réponse d'une mission est élevé pendant la phase de négociation
- ⇒ Modèle de substitution pour évaluer l'impact de l'inclusion de l'observation dans les plans de mission [TULI et al., 2022]

## Enchères automatiques [CRAMTON et al., 2006]

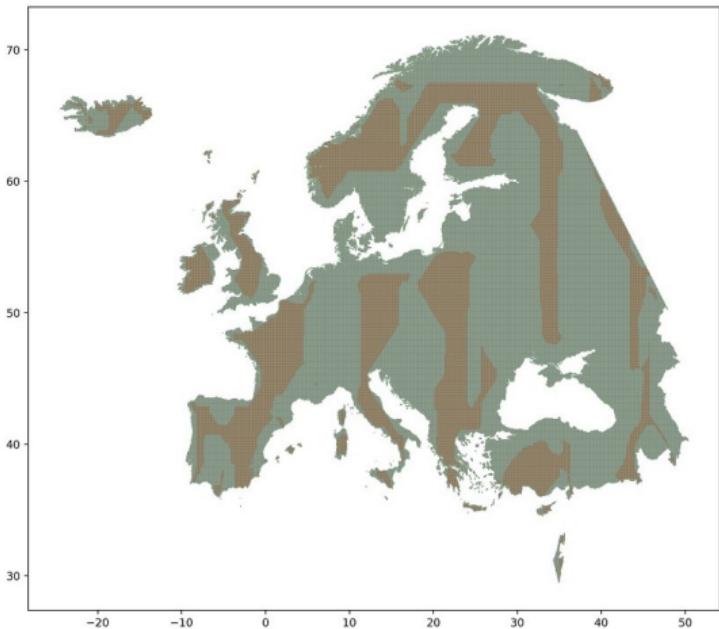
- Limiter le nombre d'interactions entre les agents
  - Première phase : les missions font des offres pour les sous-zones d'observation possibles
  - Deuxième phase : les tâches d'observation sont réparties en fonction des offres reçues
- ⚠ la construction d'offres pour chaque mission prend beaucoup de temps
- ⇒ Sauter la première phase et attribuer les tâches d'observation sur la base de sa connaissance actuelle de la capacité et de la charge de chaque mission (modèle de substitution)

# Observations fédérées

## Défis

### Problèmes hautement combinatoires

- Des centaines ou des milliers de demandes, des dizaines ou des centaines de satellites, de nombreuses façons de diviser la zone de chaque demande en un ensemble de sous-zones, etc.
- Étudier les stratégies de **distribution grossière** et de **distribution fine**
- Objectifs multiples
- Compatibilité entre les exigences associées à chaque demande et les capacités des missions



# Observations fédérées (cont.)

## Défis

### Modèle des autres agents

- La fédération doit gérer un **modèle des capacités actuelles** de chaque mission
  - Peut être **imprécis**, en particulier pour *missions externes*
  - Même pour les *missions propres*, la couche de la fédération **n'a pas un contrôle total**
- ⇒ *Apprendre un modèle de haut niveau des capacités*
- Exploitation d'un modèle de **densité des demandes hautement prioritaires**

*Comment évaluer la charge de chaque mission ?*

*Comment prévoir la réponse d'une mission ?*



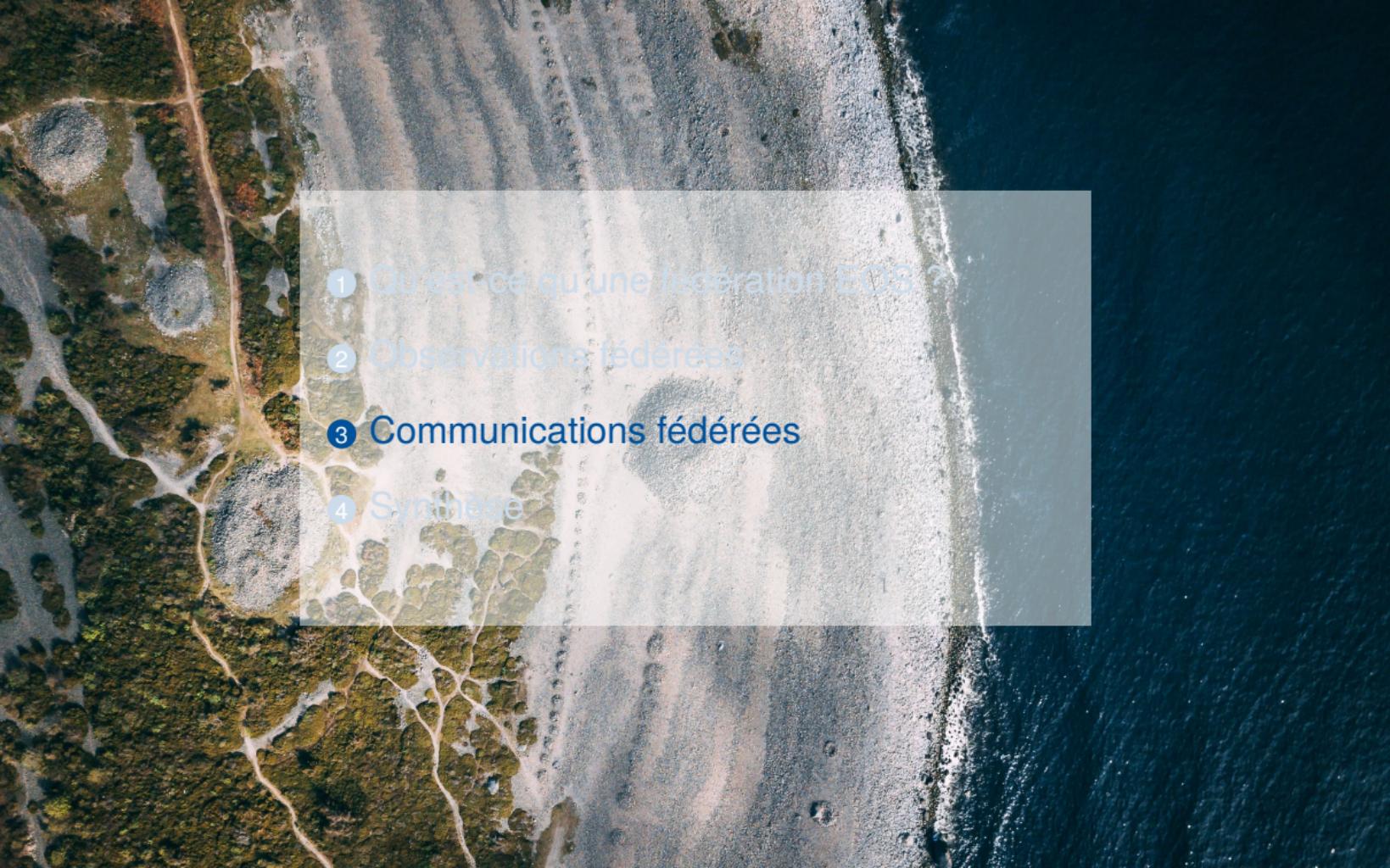
# Observations fédérées (cont.)

## Défis

### Gestion des incertitudes

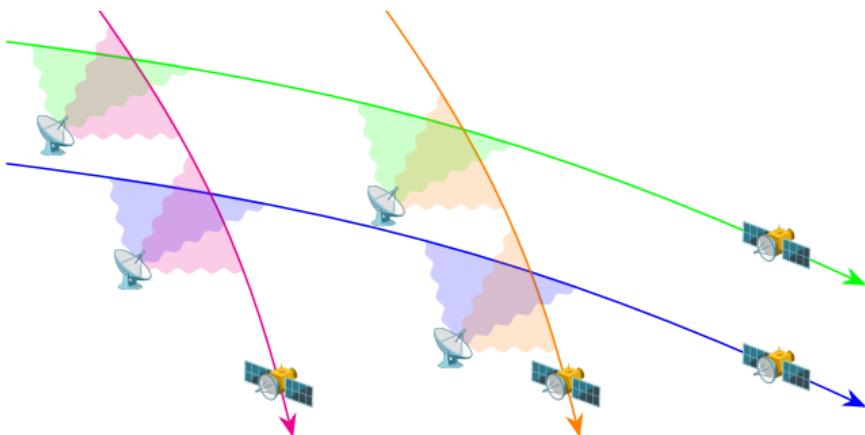
- Diverses sources d'incertitude
- e.g. Les nuages conduisent à des images ratées (environ 50%) [HADJ-SALAH et al., 2019]
- Comment exploiter les prévisions météorologiques à court terme ?
- Comment exploiter les données météorologiques historiques ?
- ⇒ Apprendre un modèle de la *récompense à long terme* fournie par une décision
- ⇒ Re-allocation en ligne pour mettre à jour automatiquement la stratégie de couverture en fonction de l'état réel de l'exécution



- 
- A large, semi-transparent white rectangular box is positioned in the center of the image, containing the following text:
- ① Qu'est-ce qu'une fédération EDF ?
  - ② Observations fédérées
  - ③ Communications fédérées
  - ④ Synthèse

# Communications fédérées

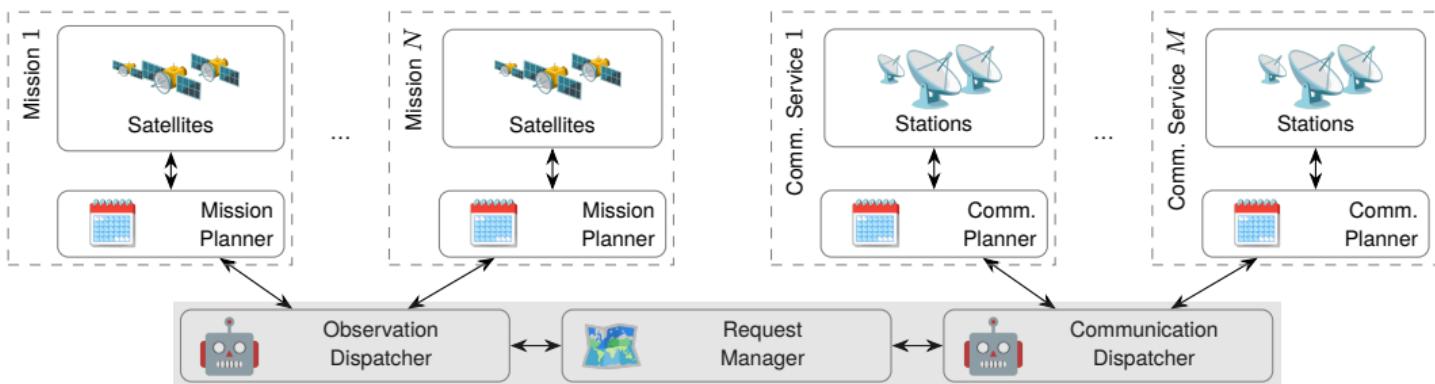
*"Comment assigner des lots de fenêtres de communication aux satellites afin de répondre aux exigences en matière de flux de données, de minimiser le brouillage et de réduire les coûts induits par les services de réservation?"*



# Communications fédérées

## Composition du système

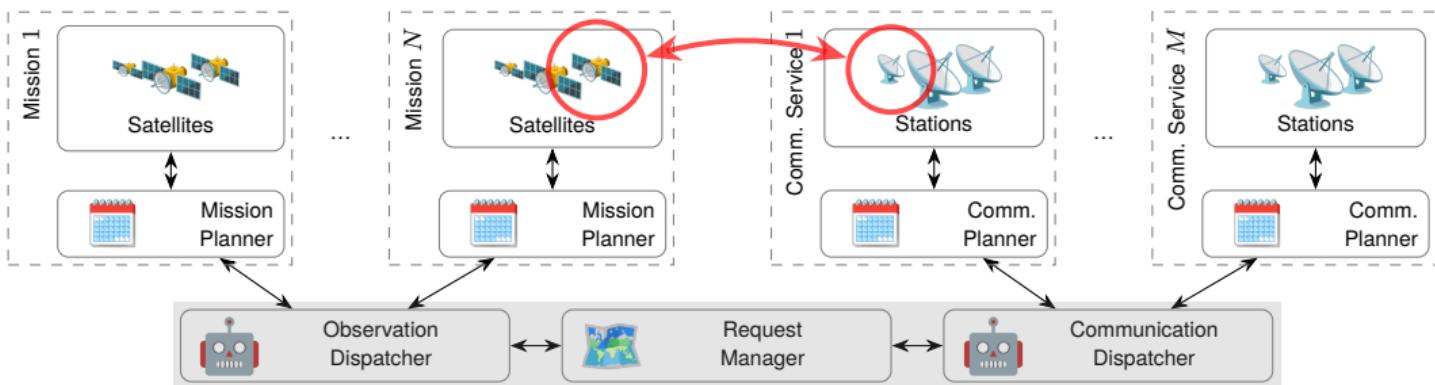
- $N$  satellites (détenus par les missions), à la recherche de fenêtres de communication
- $M$  agents de sites de communication, appelés *sites*, mettant en œuvre les interfaces GSaaS
- Several *contacts* (opportunités de communication) pour chaque paire satellite-station
- **Objectif** : attribuer des contacts aux satellites (optimisation des coûts et du brouillage)
- Respecter des exigences lors de l'interaction avec chaque fournisseur de GSaaS (SLA)



# Communications fédérées

## Composition du système

- $N$  satellites (détenus par les missions), à la recherche de fenêtres de communication
- $M$  agents de sites de communication, appelés *sites*, mettant en œuvre les interfaces GSaaS
- Several *contacts* (opportunités de communication) pour chaque paire satellite-station
- **Objectif** : attribuer des contacts aux satellites (optimisation des coûts et du brouillage)
- Respecter des exigences lors de l'interaction avec chaque fournisseur de GSaaS (SLA)



# Communications fédérées

## Décisions multi-agents

### Allocation de ressources multi-agents [CHEVALEYRE et al., 2006]

- Attribution de contacts aux satellites pour chaque demande
- Chaque allocation génère des coûts non additifs
- Chaque allocation génère du brouillage non additif

### Planification multi-agents [SHOHAM and LEYTON-BROWN, 2008]

- Planification des activités de communication des satellites
- Sous contraintes de visibilité
- Les décisions jointes peuvent conduire à du brouillage

⚠ Le modèle du brouillage est inconnu

⚠ La charge de certaines stations est inconnue (GSaaS)

# Communications fédérées

## Challenges

### Problèmes hautement combinatoires

- Grand nombre de satellites et de contacts
  - Long horizon de planification (> semaine)
  - Multi-objectifs
  - Externalités : l'utilité individuelle dépend fortement des offres groupées des autres agents
- ⇒ Des méthodes de résolution spécifiques doivent être mises au point



# Communications fédérées (cont.)

## Challenges

### Modèle des autres agents

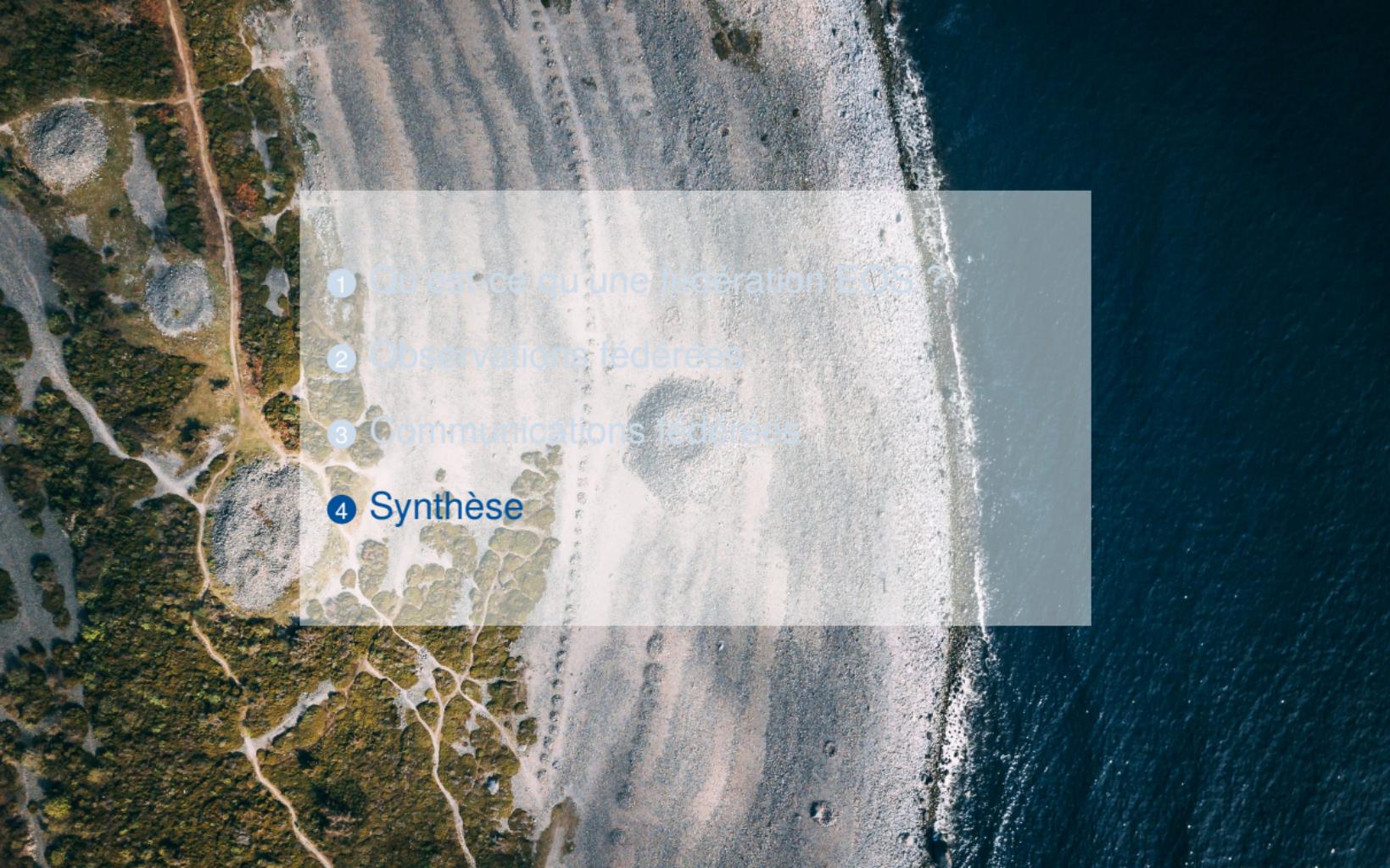
- Gérer un modèle de charge de chaque GSaaS
- Gérer un modèle de brouillage pour chaque paire de satellites
- ⇒ Apprendre la probabilité qu'une demande de contact soit rejetée
- ⇒ Apprendre le modèle de brouillage
- Gérer les comportements stratégiques
- Problème de type *Multi-Agent Reinforcement Learning (MARL)* [ALBRECHT et al., 2024]

Comment évaluer la charge de chaque GSaaS ?

Comment prévoir la réponse d'un GSaaS ?

Comment évaluer le brouillage ?



- 
- A large, semi-transparent white rectangular box is positioned in the center of the image, containing four numbered steps. The background shows a coastal area with green vegetation, a dirt road, and a rocky shoreline.
- ① Qu'est-ce qu'une fédération EDF ?
  - ② Observations fédérées
  - ③ Communications fédérées
  - ④ Synthèse

# Synthèse

---

- Termes clés du NewSpace : multi-ressources, multi-utilisateurs, multi-systèmes...
- Le partage des ressources signifie **efficacité de coût**, mais nécessite **coordination automatisée et préservation de la confidentialité et de la souveraineté**

## Synthèse(cont.)

- Comment coordonner de tels systèmes composites ?
  - Efficacité
  - Équité
  - Explicabilité

## Synthèse(cont.)

- Comment coordonner de tels systèmes composites ?
  - Efficacité
  - Équité
  - Explicabilité
- Systèmes multi-agents
  - Allocation des ressources et enchères combinatoires
  - Optimisation distribuée
  - Apprentissage fédéré et multi-agents
  - ...

## Remerciements

---

Part of this work has been performed within the DOMINO-E project which received funding from the European Union's Horizon Europe Programme for Research and Innovation under Grant Agreement n°101082230.



**Co-funded by  
the European Union**



Merci pour votre attention !  
Des questions ?

## References

---

-  ALBRECHT, Stefano V., Filippos CHRISTIANOS, and Lukas SCHÄFER (2024). *Multi-Agent Reinforcement Learning: Foundations and Modern Approaches*. Cambridge, MA: MIT Press. URL: <https://www.marl-book.com>.
-  CHEVALEYRE, Yann et al. (Jan. 2006). "Issues in Multiagent Resource Allocation". In: *Informatica* 30.
-  CRAMTON, Peter, Yoav SHOHAM, and Richard STEINBERG (2006). *Combinatorial Auctions*. Cambridge, MA: The MIT Press. ISBN: 0262033429.
-  EUSPA (2022). *EO and GNSS market report*. Tech. rep. European Union Agency for the Space Programme (EUSPA).
-  HADJ-SALAH, Adrien, Rémi VERDIER, Clément CARON, Mathieu PICARD, and Mikaël CAPELLE (2019). *Schedule Earth Observation satellites with Deep Reinforcement Learning*. arXiv: 1911.05696 [cs.LG].
-  KRAUS, Sarit (2001). *Strategic Negotiation in Multiagent Environments*. Cambridge, MA, USA: MIT Press. ISBN: 0262112647.
-  SHOHAM, Yoav and Kevin LEYTON-BROWN (2008). *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. USA: Cambridge University Press. ISBN: 0521899435.
-  TULI, S., G. CASALE, and N. R. JENNINGS (2022). "GOSH: Task Scheduling Using Deep Surrogate Models in Fog Computing Environments". In: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 33.11, pp. 2821–2833. ISSN: 1558-2183. doi: 10.1109/TPDS.2021.3136672.