



DE L'IA POUR L'AUTONOMIE À BORD

COMET « OPÉRATIONS ET OPÉRATEURS DU FUTUR »

30/03/2023

FFT Balma

Cellule IA (DTN/ISA/CID)

Denis Standardovski



Autonomie

αὐτός = soi-même

νόμος = loi, règle

Est autonome ce qui se donne ses propres lois

Abus de langage: ce que nous appelons autonomie à bord relève plutôt de **l'automatisme à bord**

Autonomie Décisionnelle

La machine décide de sa mission par elle-même

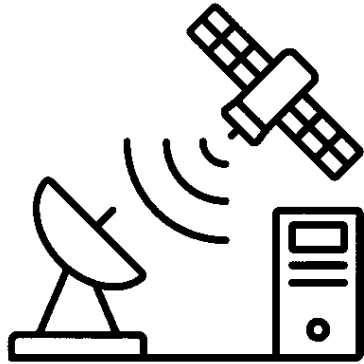
vs

Autonomie d'Exécution

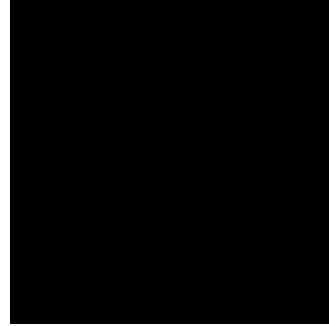
La machine se débrouille pour exécuter l'action demandée

Automatismes au service de l'autonomie

A bord de quoi ?



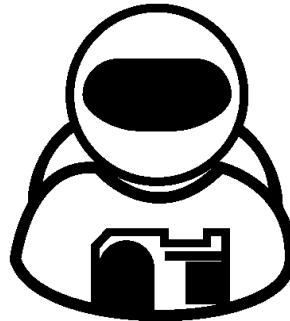
Système Spatial



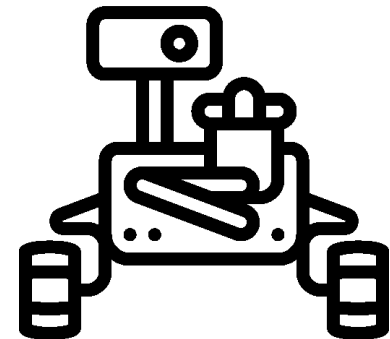
Satellite



Station Extra-Terrestre



Vol Habité



Robot

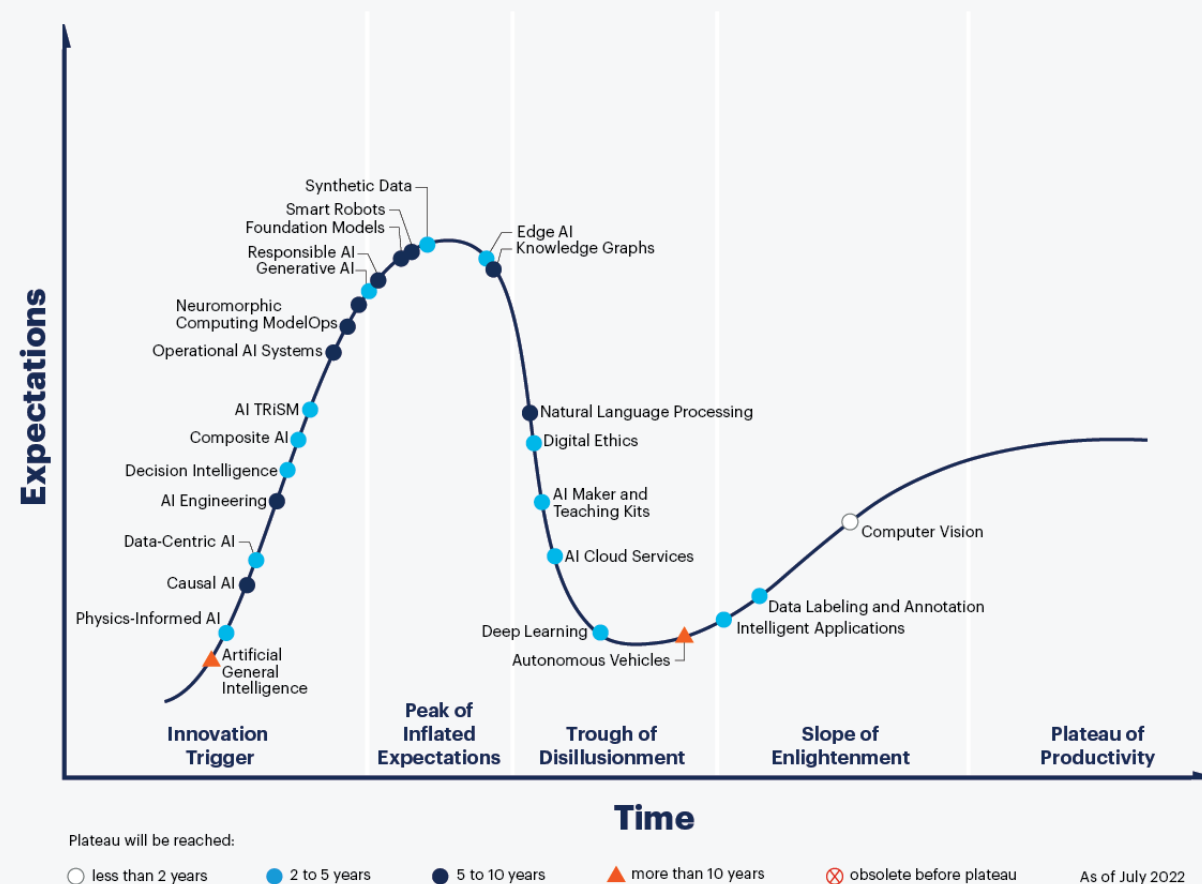
De l'Intelligence Artificielle

- ❖ Si le terme d'« intelligence artificielle » (IA) est entré dans le langage commun et son utilisation devenue banale dans les médias, **il n'en existe pas réellement de définition partagée.**

« Les systèmes d'intelligence artificielle (IA) sont des systèmes logiciels (et éventuellement matériels) conçus par des êtres humains et qui, ayant reçu un objectif complexe, agissent dans le monde réel ou numérique en percevant leur environnement par l'acquisition de données, en interprétant les données structurées ou non structurées collectées, en appliquant un raisonnement aux connaissances, ou en traitant les informations dérivées de ces données et en décidant de la/des meilleure(s) action(s) à prendre pour atteindre l'objectif donné. Les systèmes d'IA peuvent soit utiliser des règles symboliques, soit apprendre un modèle numérique. Ils peuvent également adapter leur comportement en analysant la manière dont l'environnement est affecté par leurs actions antérieures ».

Groupe d'Experts Indépendants de haut niveau sur l'intelligence artificielle de la Commission Européenne a défini les systèmes d'intelligence artificielle (8 avril 2019)

Hype Cycle for Artificial Intelligence, 2022

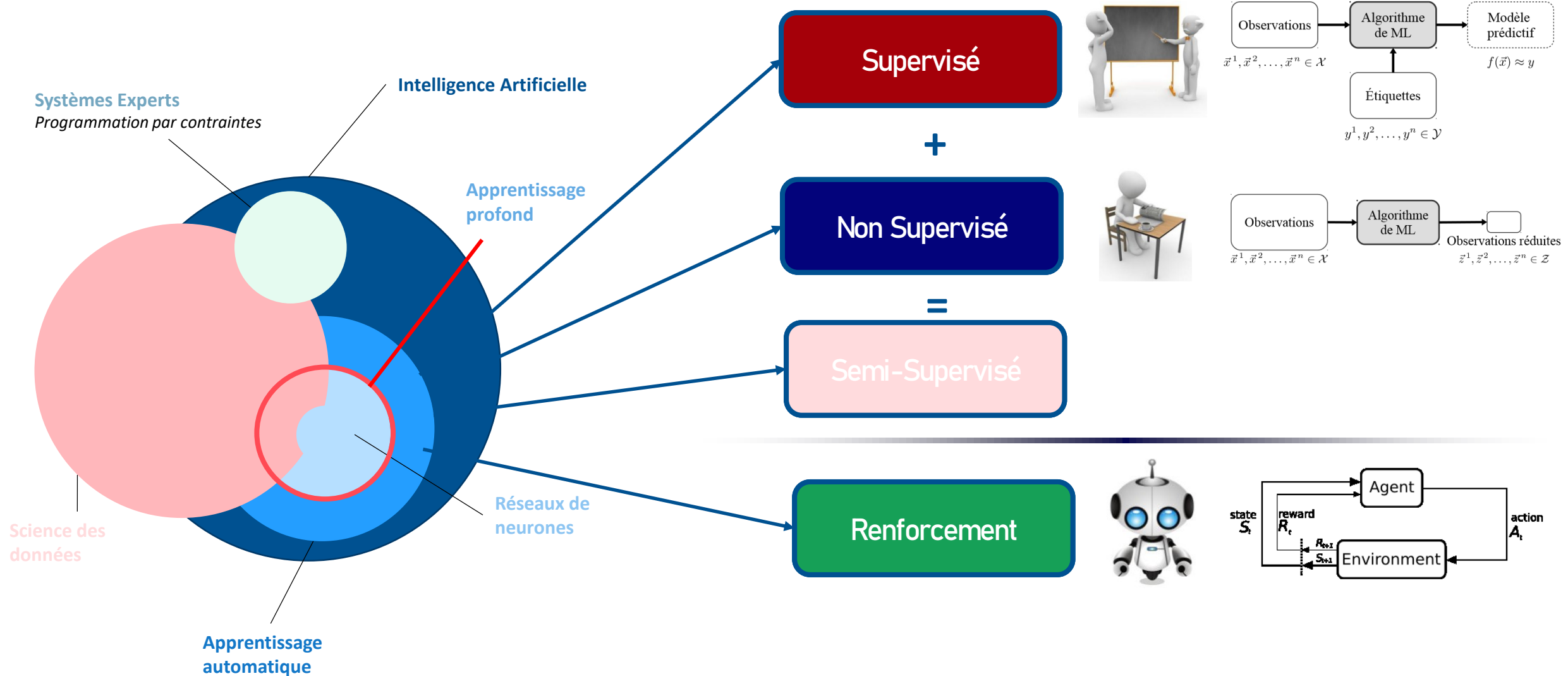


gartner.com

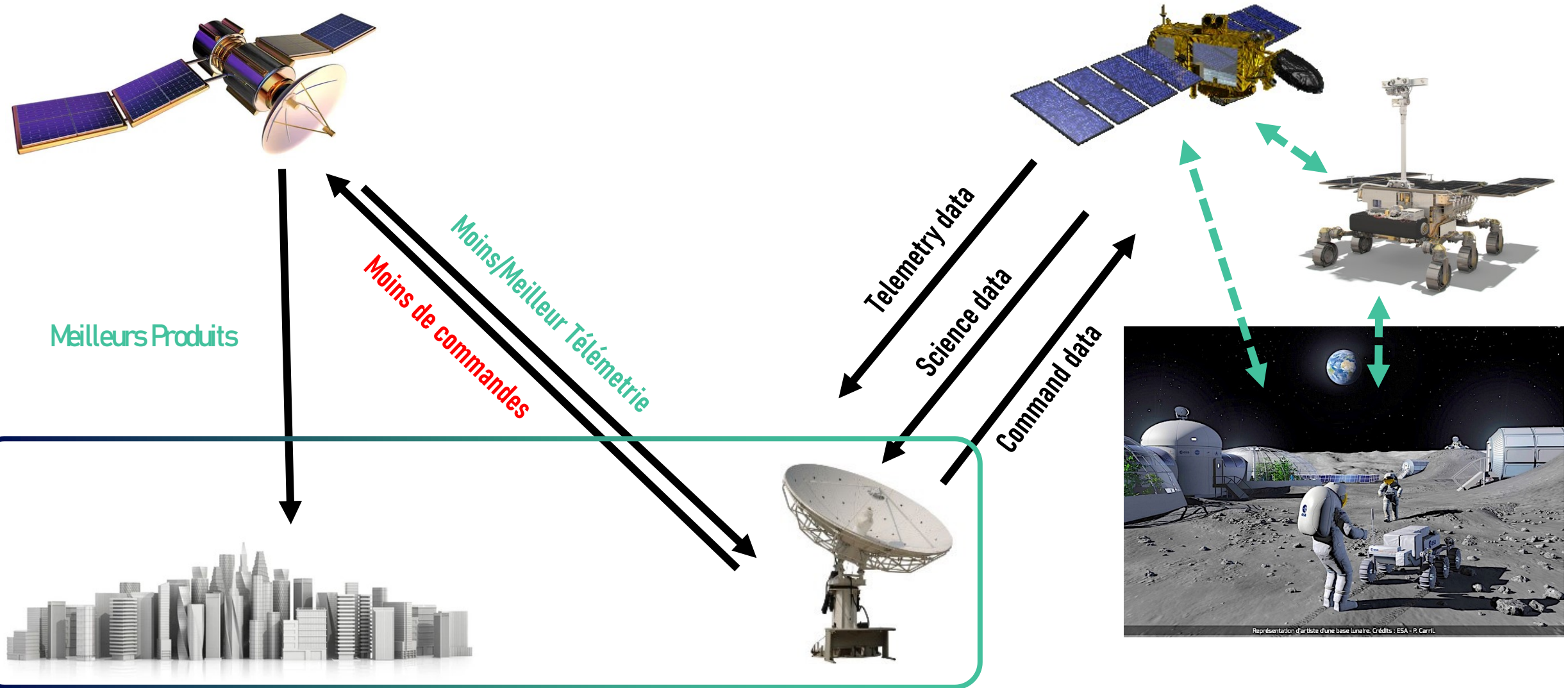
Source: Gartner
© 2022 Gartner, Inc. and/or its affiliates. All rights reserved. Gartner and Hype Cycle are registered trademarks of Gartner, Inc. and its affiliates in the U.S. 1957302

Gartner

Quel IA ?

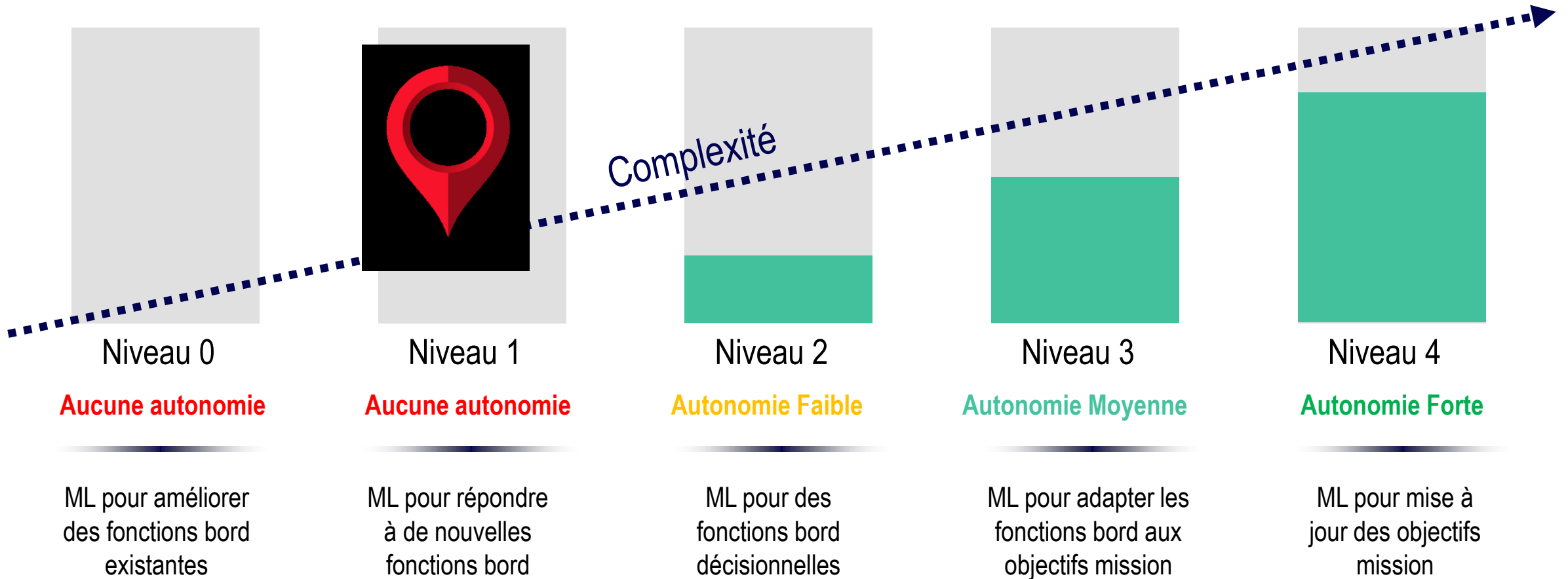


Bottleneck



Niveaux d'autonomie

❖ Apport de modèles IA dans le niveau d'autonomie



Dans quel but ?

On ne fait pas de l'IA pour faire de l'IA...

- ❖ **Simplifier et réduire le travail réalisé par les opérateurs humains dans les centres de contrôle pour effectuer d'autres tâches.**
 - Surveillance de l'état de santé d'un engin spatial et de son environnement, maintenance: identifier et traiter des anomalies...
 - Planification autonome des ressources
 - Pro activité: prédire des probabilités d'évènements avant qu'ils adviennent: space weather...
- ❖ **Répondre aux besoins de contrôle autonomes de phases plus ou moins critiques, sur des périodes où la communication avec le sol n'est pas possible ou n'est pas compatible avec les délais de réaction nécessaires.**
 - Exemple: insertion d'une sonde autour d'un corps
- ❖ **Augmenter la disponibilité des systèmes spatiaux, par l'existence à bord de mécanismes permettant une réaction immédiate à des défaillances et une reprise de l'activité normale, ou de la même sur des périodes où la communication avec le sol n'est pas possible.**
 - Exemple: satellite de télécommunications avec un haut degré de qualité de service
- ❖ **Améliorer la quantité et la qualité des données recueillies par la mission, par la présence à bord de mécanismes capables de prendre des décisions adaptées à la situation et aux objectifs courants à tout moment et sans passer par le sol.**
- ❖ **Adapter les objectifs missions en temps réel en fonction d'évènements extérieurs.**
 - Nouvelles cibles d'intérêt
 - Détection de dangers

Comment ?

- 1 Les futurs systèmes autonomes devront **coordonner plusieurs acteurs** pour produire le résultat de mission souhaité. Ces acteurs peuvent inclure des **systèmes externes**, des **sous-systèmes internes** et/ou des **opérateurs humains**.
- 2 Les futurs systèmes autonomes devront gérer et instruire les (sous-)systèmes pour **répondre aux situations attendues et inattendues**, à la fois en **interne** et dans leur **environnement**. Cela impliquera de diagnostiquer les problèmes et de concevoir des réponses appropriées.
- 3 Les futurs systèmes autonomes devront être **capables d'apprendre** de et dans des situations en constante évolution afin de **réduire l'implication humaine**. Cela nécessitera le développement **d'algorithmes d'autogestion** et/ou **d'autres méthodes d'apprentissage** supervisé, non supervisé, semi supervisé ou par renforcement.
- 4 Enfin, pour être vraiment autonomes, **ces systèmes doivent prouver leur fiabilité**, afin que les opérateurs humains puissent leur permettre de fonctionner avec un minimum d'ajustements. Cela nécessitera **des méthodes avancées de validation et de vérification de la prise de décision autonome**. Cela peut également nécessiter de développer des méthodes plus intuitives entre les humains et les systèmes.

Equipe Homme-Machine

Système métacognitif d'humains et de machines en interaction et co-dépendants qui atteignent leurs objectifs dans des environnements difficiles, dynamiques et contradictoires.

« ce n'est pas un problème majeur. C'est très satisfaisant d'avoir une explication, et cela rassure l'humain si un système d'intelligence artificielle produit une explication. **Mais, à la fin, ce que l'on veut, c'est avant tout une bonne fiabilité** »

Yann LeCun

Fiabilité / Détection d'anomalies à bord



Améliorer la fiabilité du système bord en le formant à réagir à des situations inattendues et le mener vers des états opérationnels plus sûrs.

- ❖ Etre en mesure, de manière autonome, de détecter, de diagnostiquer et de répondre plus rapidement aux anomalies dans les données de mission, de housekeeping, de gestion des sous-systèmes (actuellement, surveillance humaine importante pour diagnostiquer les anomalies).
- ❖ Détection d'anomalie à bord, FDIR
 - Fault Detection
 - Fault Isolation
 - Fault Recovery
- ❖ Voir roadmap IA CNES DTN/OP:
 - Première expérience de monitoring bord avec NOSTRADAMUS sur OPSSAT.
 - Expérience à venir sur Aerosat (tir 2024) avec implémentation de 2 algorithmes (NOSTRADAMUS + DBSCAN) et une intégration avec la FDIR



complexité



(2022) GSTP GT1I-612ED - AI based end-to-end satellite failure management and prognostic (1.4M€)

- to develop an on-board spacecraft health monitoring system based on ML Techniques and validate it on a realistic avionics test bench for a near future In Orbit Demonstration

(2019) GSTP GT1I-304ED - Machine Learning-based on board autonomy, failure prognostics and detection (800k€)

- to design, test and prototype a generic and reusable deep learning approach for both anomaly detection & isolation as well as failure prognostics

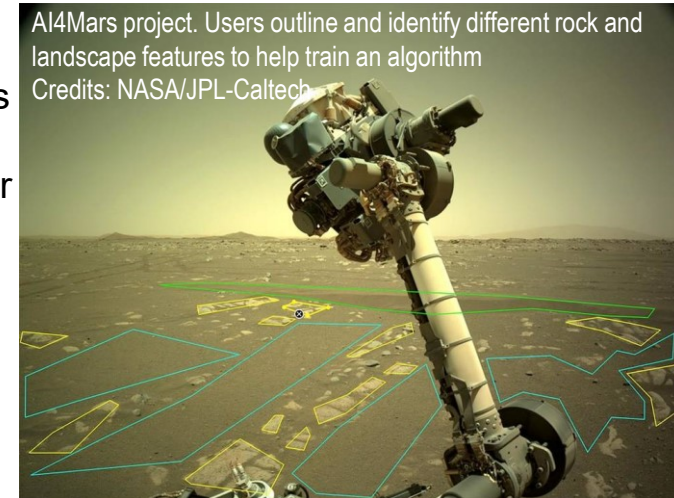


Fiabilité / Détection de dangers

Améliorer la fiabilité du système bord en le formant à réagir à des situations inattendues et le mener vers des états opérationnels plus sûrs.

❖ Rovers martiens:

- **AUTONAV** sur Spirit (2004) puis Perseverance: évalue le terrain (par imagerie) pour détecter les dangers, de manière autonome. *Approximate Clearance Evaluation (ACE) algorithm*
- **SPOC** (Soil Property and Object Classification) utilise l'apprentissage automatique pour identifier les types et les caractéristiques du terrain dans les images satellitaires et au sol. SPOC est un composant de MAARS (Machine Learning-based Analytics for Automated Rover Systems), un système d'algorithmes autonomes conçu pour améliorer la sécurité des futures missions de rover. Identification des zones de glissement, sites d'atterrissage potentiels.
- R&T CNES « **Deep learning stéréovision robotique** »: détections d'obstacles basées sur la stéréovision

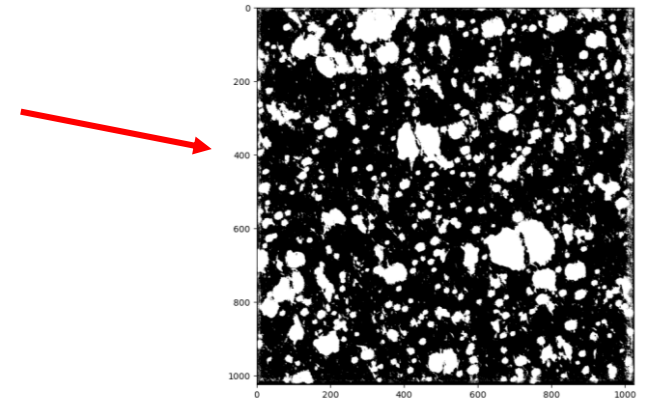


❖ Détections de débris

- ❖ **R&T CNES « Détection d'obstacles pour les atterrisseurs planétaires »**: détecter sur les images d'une caméra de descente les zones où l'atterrisseur doit éviter de se poser, en utilisant des CNNs. Lune

❖ Near-Earth Objects (NEO):

- Utiliser un ensemble de systèmes de capteurs terrestres, spatiaux et lunaires pour la détection, le suivi et l'identification de ces objets susceptibles d'entrer en collision.
- Communication entre systèmes, centralisation, algorithmes ML pour la détection et le suivi.



Fiabilité / Space Weather

Prédire et non pas subir l'environnement

❖ Space Weather

- Phénomènes éruptifs solaires, fortes activités géomagnétiques
- Risques d'indisponibilité, de défaillance ou risque pour les astronautes
- Perte de communication

❖ Planet Weather

- Exemple: panache en éruption sur Encelade ou des vents violents sur Titan. Risques de dégradations, de défauts ou de pannes.

❖ Forecasting

- Prédiction d'activités géomagnétiques: Thèse CNES/ONERA « **Deep learning for predicting and modeling the effect of CMEs on the Earth** »

❖ Nowcasting

- Démonstrateur interne CNES: « **Reconstruction de l'état de la magnétosphère à l'équateur magnétique depuis des données en orbite LEO** »

GSTP GT1I-607ED - On-board detection of space weather events (500k€)

- to demonstrate, in flight representative hardware, the on-board detection of solar events in at least one order of magnitude less time than the traditional on-ground methods



Planification / Opérations

Gérer les activités routinières, répétitives et chronophages

❖ Automatisation des Opérations

complexe

- Réduire l'assistance routinière des équipes au sol
- Tâches automatisées de planification/ordonnancement et de suivi.
- **L'opérateur jouera un rôle de superviseur**, tandis que les activités routinières, répétitives et chronophages sont déléguées à des systèmes logiciels autonomes.
- Dans un tel système automatisé, **l'opérateur définit un objectif à un niveau supérieur**, et le système est responsable de la définition des activités et du planning respectif qui aideront à atteindre l'objectif.

❖ Constellations:

- Gestion de la constellation, remplacements de satellite → apprentissage par renforcement

❖ Vol en formation

GSTP GT1I-613ED - On board processing enablers for AI for operations

- to develop an on-board avionic demonstrator where (ML) Techniques are used to enhance on-board autonomy (events prediction, detection and activities re-planning).

2019 GSTP GT1I-313OS Autonomous AI-based satellite command & control for large number of cooperating spacecraft (2019)

- to develop an autonomous AI based system for commanding and control of spacecraft constellation

2019 GSTP GT1I-314OS - Artificial Intelligence for large fleet network management (750k€)

- To develop a prototype of advanced management of complex network of large number of cooperative satellites, using AI techniques.



GNC / SCAO**Améliorer la navigation et la boucle de commande SCAO**

- ❖ **Outils pour la réduction de modèle:**
 - Propagation d'attitude par Deep Learning, R&T CNES avec ADS “**Modélisation du ballottement d'ergols avec de l'IA**”: créer des modèles simplifiés à partir de simulations CFD et intégration dans les simulateurs SCAO
- ❖ **Conception de lois de commande avec du reinforcement learning / optimisation temps reel**
 - Génération de lois de pilotage d'actionneurs gyroscopiques avec de l'IA
- ❖ **Augmentation de l'observabilité avec du ML**
 - R&T interne CNES “**Apprentissage profond pour la navigation basée vision autour d'un astéroïde** »
- ❖ **Amélioration du positionnement:**
 - R&T « **Prédiction d'horloge par machine learning** »: utilisation de ML pour la prédiction bord GNSS afin de diminuer l'erreur de positionnement
- ❖ **Contrôle adaptatif avec du Renforcement**
- ❖ **Optimisation par IA de la boucle de programmation:**
 - R&T CNES avec Thales « **Plan de vidage de constellations par machine learning** »
 - MEXAR2 (Mars Express AI Tool) est utilisé pour optimiser la transmission des paquets de données afin d'améliorer la capacité de liaison descendante.

[2022] GSTP GT1I-602SA - Artificial intelligence techniques for spacecraft attitude control and estimation – 750k€

- to develop AI based techniques to assist the design and tuning of attitude control and estimation algorithms and demonstrate improved performance with respect to Industry standard control and estimation methods. Development of RL based controller design and tuning,

[2019] GSTP GT1I-301ED - Machine Learning-based processing for star trackers (600k€)

- to develop a Machine Learning (ML) based star tracker processing prototype for Precise spacecraft attitude determination.



Rendez-vous autonome

Scanner un objet, évaluer, proposer des sites

- ❖ **L'IA peut faire progresser considérablement l'autonomie afin de fonctionner de manière robuste dans un environnement extrêmement incertain: un objet proche de la Terre.**
- ❖ **Le système évaluera la situation en « scannant » l'objet et en évaluant les dangers:**
 - Pendant la phase d'approche d'un petit corps, la trajectoire relative, le mouvement du corps et la forme du corps sont itérés, en gérant soigneusement les incertitudes.
 - Moins d'itérations avec les opérateurs sur Terre
- ❖ **Le système déterminera alors les sites d'atterrissage potentiels**
 - Le positionnement est important lors de l'accostage ou de l'atterrissage. En règle générale, ces systèmes reposent presque exclusivement sur du LIDAR, mais des techniques plus récentes, telles que le suivi des caractéristiques naturelles (NFT), utilisent des systèmes optiques.

[2022] GSTP GT1I-604SA - Deep neural network for robust satellite model matching (500k€)

- to provide means of relative pose estimation during autonomous rendezvous proximity operations with demonstrated robustness against typical backgrounds (stars, planets, other celestial objects)

[2022] GSTP GT1I-605SA - Robust Real-time constrained optimal control using machine learning (600k€)

- to leverage ML methods (e.g. guided policy search and imitation learning) to ensure computational efficiency of real-time optimal control methods, to enable enhanced performance for a range of applications, such as autonomous planetary and asteroid landing, spacecraft rendezvous & proximity operations, coupled attitude and translation control of underactuated and/or low thrust spacecraft



[2019] GSTP GT1I-309SA - 3D shape reconstruction assisted by machine learning techniques (200k€)

- to design a machine learning techniques for 3D shape reconstruction, with specific application to vision-based navigation with respect to non-cooperative unknown targets.

Détection des cibles d'intérêt

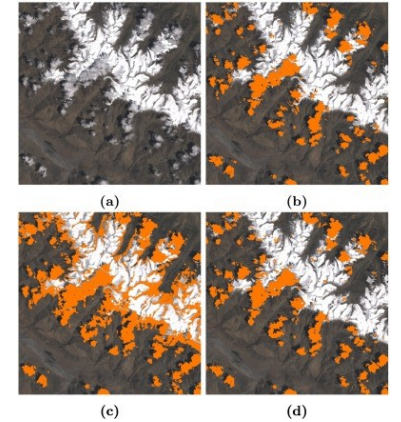
Observation autonome d'évènements sur Terre et au delà

- ❖ **Multiplier la variété de capteurs** pour fournir différentes informations (longueurs d'ondes, précision, signaux...) afin de mieux cibler une zone d'intérêt (observation de la Terre ou autres corps):
 - Non nécessairement sur le même engin (constellation, satellite, rover, stations, données sol...)
 - Traitement multivarié
 - Besoin de coopération
- ❖ **Permettre une réponse rapide en cas de crise (tâches spécifiques):**
 - Sécurité maritimes (détection de bateaux), surveillance et reconnaissance, tremblements de terre, inondations,...
- ❖ **NASA TechLeap Prize competition, Autonomous Observation Challenge No. 1:**
 - Détecter et suivre les feux de forêt
 - Identifier les panaches de gaz s'échappant dans l'atmosphère terrestre
- ❖ **Rovers martiens:**
 - **AEGIS** (Autonomous Exploration for Gathering Increased Science system) cible automatiquement les instruments de détection des rovers martiens, analyse les images collectées pour l'identification et le ciblage des caractéristiques d'intérêt (utilisé par Chemcam)

Traitement des données pertinentes

Réduire la bande passante

- ❖ **Réduire la bande passante de transmission avec un traitement à bord en reconnaissant et en capturant les données des capteurs avec des informations pertinentes et en éliminant celles qui sont inefficaces:**
 - Algorithmes de deep learning embarqué (segmentation/classification) pour détecter (nuages, ombres...) afin de ne pas redescendre l'information non pertinente
- ❖ **Utilisation de ML pour la prédiction et/ou la détection d'événements spécifiques afin de permettre une réponse autonome (par exemple, recalibrage de l'instrument, sélection du mode opératoire, etc.):**
 - Voir « Cibles d'intérêt »: inondations, feux, éruptions volcaniques, ouragans...
- ❖ **Mars:**
 - **OASIS** (Onboard Autonomous Science Investigation System for Opportunistic Rover Science): identifier, analyser et transmettre uniquement des portions d'images ou des images complètes contenant les caractéristiques ciblées ou souhaitées après avoir analysé les images du rover Navcam sur la présence de tourbillons de poussière et de nuages.
 - **SCOTI** (Scientific Captioning Of Terrain Images) crée automatiquement des légendes qui décrivent les caractéristiques géographiques des images de la surface martienne. Utilisé pour donner la priorité à la liaison descendante des images de terrain avec des légendes contenant certains mots correspondant aux caractéristiques de terrain souhaitées ou vice-versa.



[2019] GSTP GT1I-305ED - AI for non mission critical on board data processing (1M€)

- investigating the possibility of using AI-based algorithms to improve the autonomy and the efficiency of the on-board management of payload data.



Gestion des ressources à bord

Meilleure gestion de l'énergie, des ressources de calcul

Energie

❖ Rovers martiens

- **Mars Express (MEX)**: en 2019, modèle ML formé avec 3 ans de données de télémétrie et de données du système thermique (y compris le courant électrique mesuré du système thermique), pour prédire les valeurs du courant électrique utilisé par le système thermique.
- **VeeGer** (pour futurs rovers):
 - VeeGerTerramechanicsNet (CNN) prédit un modèle terramécanique simplifié des interactions roue-terrain à l'aide d'images de profondeur et RGB, puis calcule la consommation d'énergie sur la base de ce modèle.
 - VeeGerEnergyNet (CNN) utilise uniquement des images RVB et de profondeur capturées par des caméras mobiles pour estimer directement la consommation d'énergie

Mémoire/Calcul

- ❖ Déport des traitements ML des DPU vers l'OBC
- ❖ Optimisation du plan de vidage TM

GSTP GT1I-609ED - Architecture for offline processing and machine learning in mass-memories (800k€)

- To develop and demonstrate an architecture that allows offline processing of payload data in a central mass-memory unit within ESA missions, such as image processing, machine learning inference, and image/data compression.



Vols habités

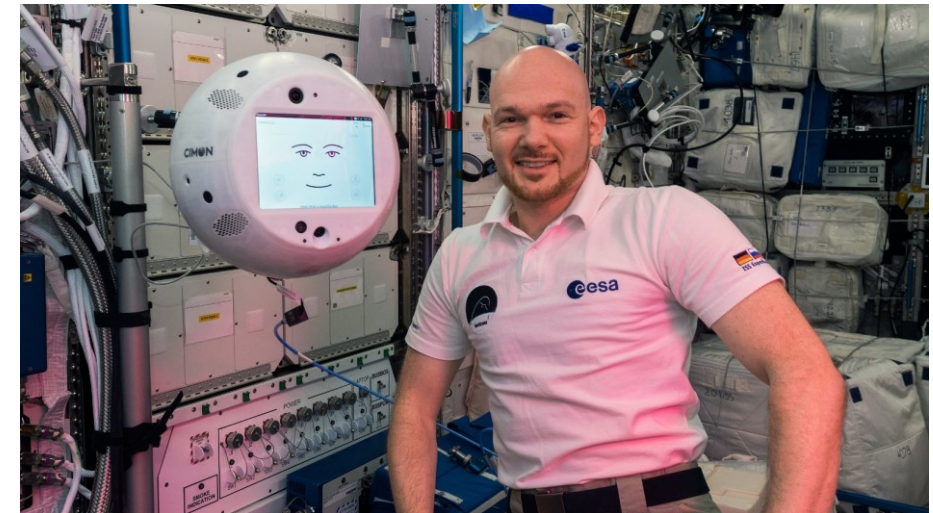
Superviser l'habitat
Aider les astronautes dans leurs missions
Apporter une compagnie



AI4U

Voir présentation dédiée

- ❖ Forts besoins d'autonomie dans la gestion de l'habitat.
- ❖ Besoin de faciliter l'interaction avec le véhicule ou la base.
- ❖ Aider à l'équilibre psychologique des astronautes: CIMON (DLR), AI4U (CNES)



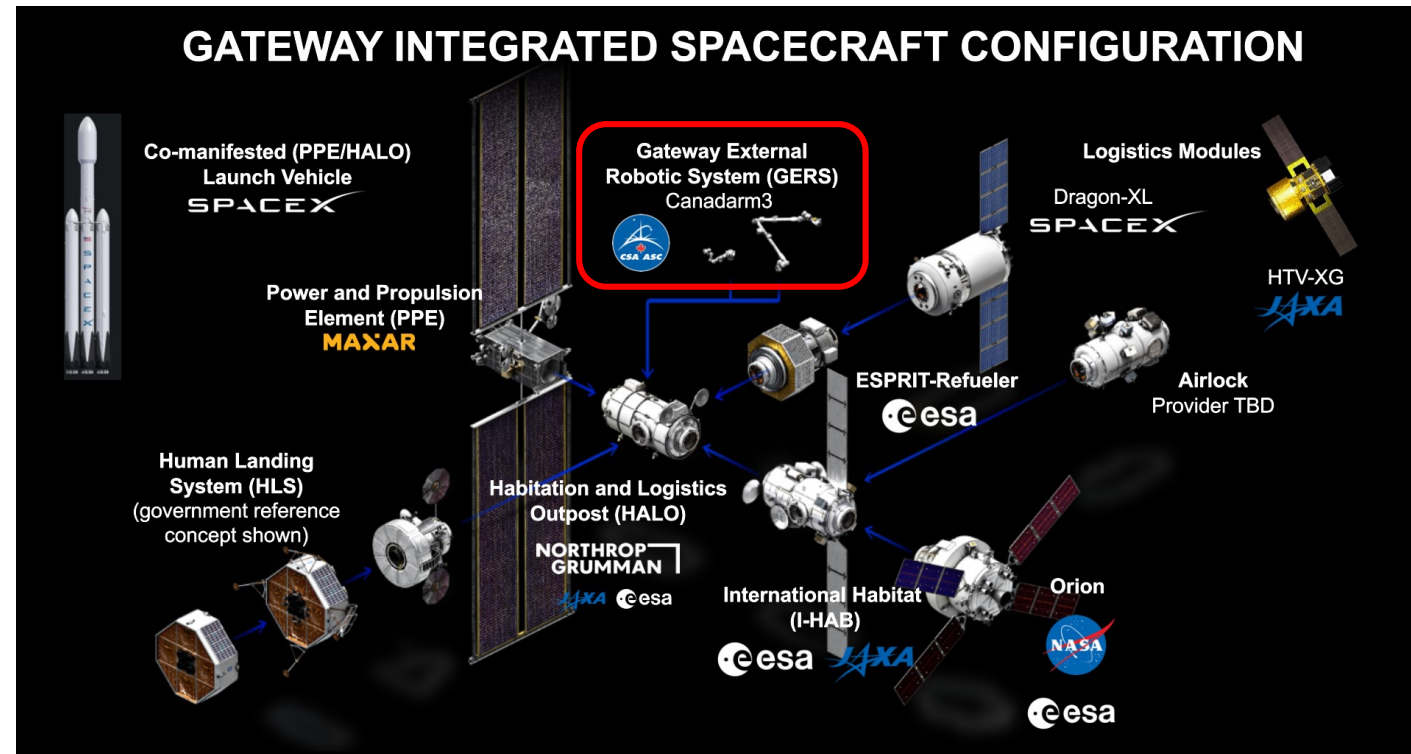
ESA astronaut Alexander Gerst with CIMON, an artificial intelligence helper aboard the station

Robotique

Actions mécaniques sans supervision humaine

❖ Exemple: Gateway

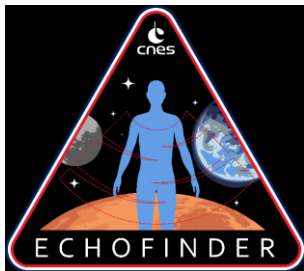
- Capacité de bande passante limitée, besoin d'effectuer des opérations robotiques en bout en bout.
- Ensemble de planificateurs IA indépendants et spécifiques: permet de décomposer un objectif en un ensemble d'actions que la robotique devra exécuter.
- Utilisation de CNN pour évaluer si l'approche est bonne.
- Utilisation de RNN pour détecter les anomalies et prioriser la télémétrie pertinente.

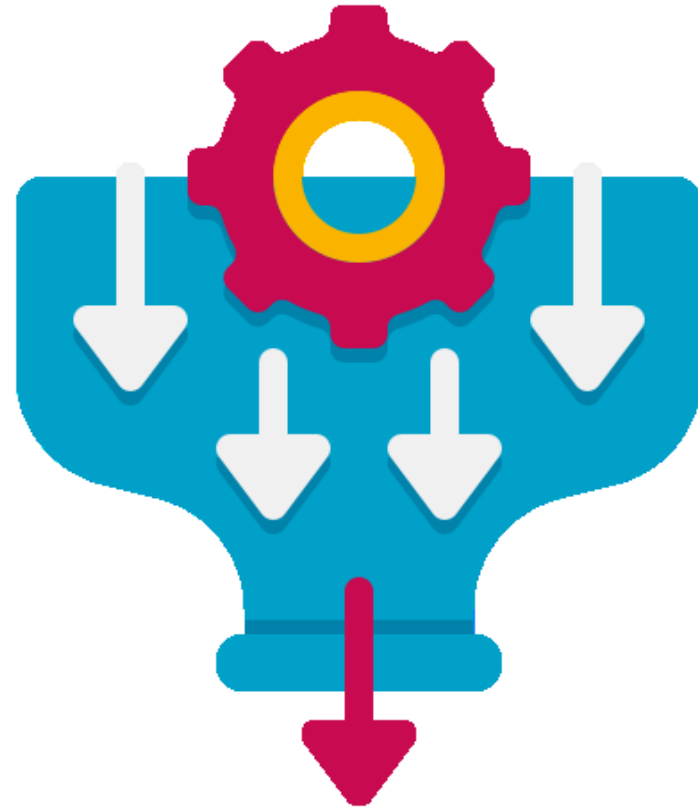


Vols habités

Aide au diagnostic médical

- ❖ Délais de communication accrus
- ❖ Plus de téléguidage et téléopération possible
- ❖ L'astronaute doit être autonome
- ❖ Exemple: Echofinder
 - L'astronaute ne peut pas être formé pour maîtriser l'échographie
 - Trop de pratique nécessaire
 - Déjà beaucoup de procédures et de systèmes à maîtriser





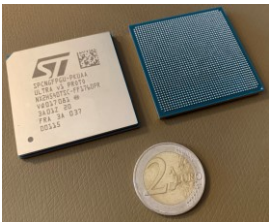
Contraintes matérielles

❖ Verrous technologiques

- **Consommation / dissipation thermique** (liées aux traitements massifs)
- **Ressources disponibles** (mémoire, unités logiques, ...)

❖ Solutions techniques

- Fort intérêt pour les **COTS**: efficacité en puissance plus grande, outils de synthèse haut niveau
- Solutions sur composants **Rad-Hard** (applications critiques à plus faible débit)
- **Simplifier et optimiser les algorithmes** avec maintien de la performance (pruning, distillation...)
- Prise en compte des architectures matérielles **dans la conception des modèles**



Thèse « **Satellite Image Compression and Denoising With Neural Networks** », Vinicius Oliveira (TéSA, Toulouse)



Thèse « **Highly compressed/quantized neural networks for FPGA on-board processing in Earth Observation by satellite** », Cédric Gernigon (INRIA, Rennes)

Démonstrateur **SPIP – Smart Processing for Imaging Payloads**: développement de traitements applicatifs et démonstration sur carte numérique nouvelle génération (OTHR)

Démonstrateur en vol **CO3D** - démonstration du modèle algo (OTHR) fourni par un client, possibilité de mettre à jour un réseau depuis le sol

[2022] **GSTP GT11-608SW - Qualified software machine learning toolkit for space hardware (900k€)**: to develop and qualify a software toolkit for ML deployment and inference in space hardware.



[2019] **GSTP GT11-302ED - Machine learning application benchmarking on COTS inference processors (600k€)**: to design and develop of benchmarks to assess the performance of AI-related algorithms, computer vision and ML

[2019] **GSTP GT11-303ED - Complexity reduction for optimized lightweight on-board AI inference (600k€)**: to define and develop a set of tools and a workflow in order to enable the inference of Artificial Neural Networks (on future space missions).

Confiance / Cybersécurité

- ❖ C'est encore un problème non résolu **d'expliquer les relations entre les entrées d'un modèle et les sorties finales** (boîte noire), en particulier sur les systèmes d'IA basés sur le Deep Learning.
- ❖ **L'incapacité de revenir en arrière durant le processus d'inférence** entrave l'adoption de modèles d'IA pour les systèmes critiques tels que les satellites qui exigent plutôt que le processus d'inférence soit manifeste et non ambigu, éventuellement soutenu par des modèles mathématiques bien définis.
- ❖ **Il y a besoin de normes de données et de protocoles de communication suffisamment robustes** pour permettre des opérations autonomes à base d'IA tout en fournissant une **cybersécurité suffisante** pour maintenir la confiance aux informations provenant de systèmes autonomes.
- ❖ La prise de décision autonome par IA ne peut pas être effectuée d'une manière fiable pour atteindre les objectifs de performance, car **il y a un manque d'outils permettant l'analyse de la prise de décision autonome**: ces outils doivent pouvoir l'expliquer pour permettre l'instauration de la confiance.
- ❖ **Il y a un manque d'outils de vérification valides et de métriques** établies pour évaluer les systèmes autonomes à base d'IA et il est difficile de prédire la durée et la rigueur des tests nécessaires pour leur faire confiance: Comment les tester ? Comment être représentatif de l'environnement ? Comment évaluer leur niveau de tolérance aux pannes ?
- ❖ L'adoption de nouvelles capacités autonomes prend du temps ou ne se produit pas, car **il y a un manque de coordination** entre les experts métiers, les opérateurs et les architectes IA pour renforcer la confiance dans un système IA.

2019 GSTP GT1I-306ED - Robust machine learning systems for dependable space applications (600k€)

- to develop methods for detection and rejection of adversarial examples in security sensitive and safety-critical systems using deep Convolutional Neural Networks (CNNs).



Merci pour votre attention

(vous pouvez maintenant me poser vos questions sur ChatGPT)