

Intelligence Artificielle, Systèmes Spatiaux de Défense et Intégration Humains Systèmes

Guy André Boy^{1,2}

¹Membre Titulaire de l'Académie de l'Air et de l'Espace
Président du Comité Scientifique et Technique sur l'Intégration Humains Systèmes

²Chercheur Associé à l'ISAE-SUPAERO et l'ESTIA

guy.andre.boy@academieairespace.com

Résumé

L'objectif de cette contribution est d'enrichir la réflexion par une dimension transversale essentielle : l'intégration humains systèmes (HSI), l'ingénierie des systèmes complexes et la place de l'IA dans cette architecture globale. L'IA n'est pas seulement un outil technologique : elle reconfigure profondément la relation entre les opérateurs humains et les systèmes complexes qu'ils supervisent. Comprendre cette reconfiguration est une condition de la maîtrise opérationnelle et de la résilience stratégique.

Mots-clés

Intégration humains-systèmes, intelligence artificielle, espace, défense, systèmes sociotechniques.

Abstract

This paper aims to enrich the debate by introducing a key cross-cutting dimension: human systems integration (HSI), the engineering of complex systems, and the role of AI within this overall architecture. AI is not merely a technological tool: it profoundly reshapes the relationship between human operators and the complex systems they oversee. Understanding this reshaping is a prerequisite for operational mastery and strategic resilience.

Keywords

Human systems integration, artificial intelligence, space, defense, socio-technical systems.

1 Introduction

Ce document est l'avis d'un scientifique et d'un ingénieur sur le rôle des humains et des organisations dans le déploiement des systèmes sociotechniques spatiaux de défense à base d'intelligence artificielle (IA). Cet avis est basé sur presque un demi-siècle de recherches et de mise en pratiques de facteurs humains et organisationnels dans les secteurs aéronautique et spatial, tout particulièrement en ce qui concerne l'automatisation accrue, l'ingénierie des systèmes et les questions contemporaines d'autonomie croissante, à la fois du côté humain et du côté machine.

L'intégration humains systèmes, ou HSI (*Human Systems*

Integration) [1] est la discipline qui étudie et conçoit les relations, les processus et les organisations permettant à des opérateurs humains de travailler efficacement au sein de systèmes sociotechniques complexes [2]. Plus spécifiquement dans le secteur des systèmes sociotechniques spatiaux de défense, nous devons distinguer trois configurations :

- **Human(s)-in-the-loop (HITL)**. L'opérateur humain valide chaque décision critique. L'IA propose ; l'humain dispose. Applicable aux décisions à fort enjeu (engagement, manœuvres risquées) ; il existe bien sûr plusieurs niveaux d'automatisation, dépendants de leur degré de maturité.
- **Human(s)-on-the-loop (HOTL)**. L'IA exécute de manière autonome dans un périmètre défini ; l'opérateur la surveille et peut intervenir. Adapté à la supervision de flottes en orbite basse.
- **Human(s)-out-of-the-loop (HOOTL)**. Autonomie complète du système dans un cadre temporel ou géographique délimité – réservé à des cas extrêmes, avec des garanties de sécurité très élevées.

Le passage d'un mode à l'autre est une décision de conception qui implique des choix éthiques, opérationnels et juridiques. Pour les systèmes de défense, la doctrine française et les engagements de l'OTAN imposent le maintien d'un contrôle humain sur les décisions de nature létale.

2 La cognition systémique

2.1 Charge cognitive et informationnelle

Les systèmes spatiaux de défense génèrent des volumes de données considérables, notamment l'imagerie satellitaire et les données de télémétrie. L'IA est souvent présentée comme une solution à la surcharge informationnelle — mais elle peut aussi en être une source si elle n'est pas conçue avec soin. Les risques identifiés sont :

- **complaisance** : l'opérateur fait aveuglement confiance au système automatisé et perd sa vigilance critique ;
- **biais** : tendance à adopter les recommandations de

- l'IA même en présence de signaux contraires ;
- **fatigue** : multiplication des alertes et des indicateurs qui noient les signaux critiques dans le bruit informationnel ;
- **dégradation des compétences** : perte progressive des compétences manuelles liée au manque de pratique, ce qui rend la reprise en main difficile en cas de défaillance du système.

Les systèmes sociotechniques dans les centres de commandement spatial doivent intégrer, dès la phase de conception et tout au long de leur cycle de vie, les principes du HSI et de la *cognition systémique* [3] : charge de travail adaptée, transparence des décisions algorithmiques, maintien des boucles de supervision active et gestion de la confiance dans un contexte de collaboration systémique humains-machines.

2.2 Explicabilité et confiance

La confiance opérationnelle dans un système d'IA repose en grande partie sur sa capacité à rendre intelligibles ses décisions pour l'opérateur. Nous parlons ici de tangibilité à la fois physique et cognitive. Ce défi, souvent désigné sous le terme d'explicabilité (XAI — *eXplainable AI*) [4], est particulièrement critique dans les environnements de défense où :

- la question du partage d'**autorité** se pose (qui commande et qui est responsable ?) ;
- les **conséquences** d'une décision erronée peuvent être **irréversibles** ;
- la « redevabilité » (*accountability*) exige une **traçabilité** documentée des décisions automatisées ;
- les opérateurs doivent pouvoir **évaluer rapidement** si une recommandation algorithmique est fiable dans le contexte courant.

Les approches d'IA explicable (SHAP, LIME, mécanismes d'attention) doivent être intégrées aux systèmes opérationnels, et non pas comme une couche d'affichage secondaire, mais comme un composant architectural à part entière. La tangibilité cognitive (ou figurative) revêt une importance considérable [5].

2.3 Résilience et continuité opérationnelle

Un système spatial de défense doit rester opérationnel, y compris en cas de dégradation ou de défaillance de ses composants d'IA. Cela implique :

- la conception de **modes dégradés** (*fallback*) clairs, avec des procédures de reprise en main manuelle entraînées régulièrement ;
- la préservation et l'entretien des **compétences opérationnelles** en dehors des modes automatisés ;
- des exercices de simulation dégradée intégrant des **scénarios** de panne ou de corruption des systèmes d'IA (tests d'intrusion ou *adversarial testing* en anglais) ; à ce titre, il est fortement conseillé

d'adapter une approche de scenario-based design du type PRODEC, développée pour la conception de systèmes vitaux à autonomie croissante [6].

3 L'ingénierie des systèmes complexes

Les systèmes spatiaux de défense de nouvelle génération sont des **systèmes de systèmes** (SoSs : *Systems of Systems*) : ils agrègent des composants hétérogènes (par exemple, des satellites, segments sol, liaisons de données, centres de commandement, réseaux alliés) dont les interactions non-linéaires génèrent des **comportements émergents** difficiles à prévoir et à maîtriser. La méthodologie PRODEC est aussi très performante pour aider à déduire des propriétés émergentes.

3.1 Les systèmes de systèmes spatiaux

Les SoSs spatiaux de défense présentent des propriétés spécifiques qui complexifient leur ingénierie :

- **indépendance opérationnelle des composants** : chaque sous-système (satellite, segment sol, réseau de transmission) peut fonctionner de manière autonome ;
- **évolutivité** : les constellations LEO peuvent être recomposées en vol (ajout, retrait ou remplacement de satellites) ;
- **hétérogénéité technologique** : coexistence de systèmes patrimoniaux (*legacy*) et de composants *New Space* issus d'acteurs commerciaux ;
- **interdépendances non planifiées** : les interactions entre sous-systèmes autonomes peuvent produire des comportements non spécifiés ;
- **multi-gouvernance** : des acteurs aux intérêts divergents (armées, agences civiles, industriels, alliés) contribuent au système global.

Nous voyons bien ici que les systèmes de défense dotés d'IA ne peuvent pas faire l'impasse sur les exigences humaines et sociétales. Il est recommandé d'utiliser le triptyque technologies-organisations-personnes (le cadre de travail TOP) [7].

3.2 Rôle de l'IA dans l'ingénierie des SoSs

L'IA intervient à plusieurs niveaux de l'ingénierie des SoSs spatiaux de défense :

- **optimisation de l'architecture** : exploration automatisée de l'espace de conception (placement orbital, allocation de ressources spectrales, redondance) ;
- **supervision et monitoring** : détection d'anomalies en temps réel, diagnostic de pannes et prédiction de défaillances (données télémétriques) ;
- **simulation et jumeaux numériques** : modélisation comportementale du SoS pour la validation et l'entraînement des opérateurs ;
- **gestion de la configuration** : suivi du cycle de vie des composants logiciels et matériels dans un

- environnement hautement distribué ;
- **planification adaptative** : reconfiguration dynamique du SoS en réponse à des événements (panne, congestion, menace).

3.3 Défis de certification et de vérification

L'intégration de l'IA dans des systèmes critiques de défense soulève des questions fondamentales de certification. Les approches classiques de vérification (tests exhaustifs, preuves formelles) se heurtent à la nature statistique et opaque des modèles d'apprentissage automatique. Les axes de recherche en cours incluent :

- **maturité** : technologique (TRL), humaine (HRL), et organisationnelle (ORL) [8] ;
- **vérification formelle partielle** : propriétés de robustesse locales, bornes de confiance sur les sorties ;
- **test d'intrusion et la red-teaming automatisée** pour identifier les comportements indésirables ;
- approches de **certification basée sur les risques**, adaptées aux systèmes évolutifs en opération ;
- **standardisation des exigences de sécurité en IA** pour les systèmes de défense (travaux de l'OTAN, ASD-STAN, EUROCAE).

Enjeux réglementaires. L'*AI Act* européen (2024) [9] introduit des exigences spécifiques pour les systèmes d'IA à haut risque, dont certaines applications de défense. La qualification des algorithmes embarqués dans des systèmes spatiaux militaires devra intégrer ces nouvelles contraintes réglementaires, articulées avec les cadres de certification spatiale (ECSS) et les directives de défense nationales.

3.4 Approches MBSE et IA

Le *Model-Based Systems Engineering* (MBSE) est une approche qui met au centre la conception et la gestion du cycle de vie des systèmes complexes à l'aide de modèles formels tels que SysML, UPDM et UAF [10]. L'IA offre de nouvelles perspectives pour enrichir le MBSE :

- **génération automatique de modèles** à partir de documents de spécification (traitement du langage naturel appliqué aux exigences) ;
- **analyse de cohérence et de complétude des modèles** par apprentissage sur des bases de connaissances sectorielles ;
- **exploration de l'espace des architectures possibles** par des algorithmes d'optimisation évolutionnaire ;
- **couplage des modèles MBSE à des jumeaux numériques** pour la simulation comportementale et l'entraînement des opérateurs.

4 Les enjeux transversaux

4.1 Éthique, droit et gouvernance

L'usage de l'IA dans les systèmes de défense soulève des questions éthiques et juridiques qui dépassent les seuls

enjeux techniques. Le maintien d'un contrôle humain significatif sur les décisions létales est un principe fondamental affirmé par la France et ses alliés. Sur le plan juridique, l'applicabilité du **droit international humanitaire** (DIH) [11] aux systèmes autonomes et à l'IA reste un chantier ouvert, notamment en ce qui concerne la distinction, la proportionnalité et la précaution.

4.2 Sécurité en environnement hostile

Les systèmes d'IA embarqués dans des plateformes spatiales de défense sont exposés à des menaces spécifiques : attaques des adversaires (perturbation des entrées pour tromper le modèle), empoisonnement des données d'entraînement, attaques sur la chaîne d'approvisionnement logicielle et effets des radiations sur les composants de calcul. Non seulement la cybersécurité de l'IA, une discipline émergente, doit être intégrée dès la conception des systèmes, mais doit aussi être comprise des opérateurs humains impliqués.

4.3 Formation et culture IA dans les organisations de défense spatiale

L'adoption de l'IA dans les systèmes spatiaux de défense n'est pas qu'un défi technologique, c'est aussi un défi organisationnel et culturel. Opérateurs, ingénieurs et décideurs doivent développer une culture de l'IA qui intègre :

- une compréhension des capacités et des limites des algorithmes utilisés ;
- des réflexes de questionnement critique face aux recommandations algorithmiques ;
- des compétences de supervision active et de reprise en main manuelle ;
- une sensibilisation aux biais algorithmiques et à leurs conséquences opérationnelles.

Les cursus de formation initiale et continue devraient donc intégrer des modules de culture en IA, en s'appuyant sur des simulations et des exercices de type *red-teaming*. La collaboration entre les chercheurs, les industriels et les forces armées est essentielle à l'élaboration de ces référentiels de compétences appropriées.

5 Recommandations et perspectives

Six recommandations pour les acteurs de la communauté spatiale de défense concernant l'IA :

- **Approche Human-Centered AI.** Placer l'opérateur humain au centre de la conception des systèmes d'IA [12]. Définir explicitement le mode d'interaction humain-système (HITL ou HOTL) pour chaque fonction critique.
- **Explicabilité opérationnelle.** Exiger une explicabilité adaptée au contexte opérationnel pour toute IA intégrée à un système de commandement ou de supervision spatiale.

- **Certification.** Adopter des approches de certification adaptées à la nature statistique des modèles d'IA, en intégrant les exigences de l'*AI Act* et les standards sectoriels (ECSS, ASD-STAN). Il est à noter que la notion de certification peut être discutée et pourrait évoluer vers la notion de qualification [6].
- **Résilience et modes dégradés.** Concevoir systématiquement des modes de fonctionnement dégradés sans IA et maintenir les compétences humaines de supervision manuelle grâce à des entraînements réguliers.
- **MBSE augmenté par l'IA.** Déployer des approches MBSE enrichies par l'IA pour la gestion du cycle de vie des SoS spatiaux, en couplant des modèles formels et des jumeaux numériques.
- **Culture et formation en IA.** Investir dans la formation des opérateurs et des ingénieurs de défense spatiale à la culture de l'IA, en intégrant des modules de pensée critique. Il s'agit ici de la collaboration humain(s)-IA.

6 Conclusion

L'IA constitue un moteur majeur de transformation pour les systèmes de défense spatiaux, à condition que les personnes et les organisations soient pleinement prises en compte. C'est la raison pour laquelle l'intégration humains systèmes, le HSI (*Human Systems Integration*), une nouvelle discipline qui intègre non seulement l'ingénierie des systèmes complexes, l'informatique en pleine évolution et les sciences humaines et sociales [13], doit entrer dans la problématique de l'IA de défense. Dans ces conditions, l'IA ouvre des possibilités inédites en matière d'autonomie, de réactivité et de traitement de l'information à grande échelle. Mais cette transformation ne peut être bénéfique et maîtrisée que si elle s'accompagne d'une réflexion approfondie sur le HSI, l'ingénierie de la complexité, la gouvernance des algorithmes et la gestion de l'imprévu.

Le cadre de travail offert par la *cognition systémique* [3] permet d'associer l'approche multi-agent de l'IA à celle des systèmes de systèmes (SoS) de l'ingénierie des systèmes humains et machines. Il permet aussi de servir de support au développement d'une meilleure intégration humains systèmes (HSI). Notamment, il pourrait être très utile au développement de SoS militaires garantissant la résilience et la préservation de la conformité aux principes éthiques et juridiques, et relevant de la responsabilité collective de l'ensemble des acteurs ici réunis.

Façonner l'espace de demain, c'est d'abord façonner les systèmes associant des humains et des machines, ainsi que les organisations sous-jacentes, qui l'habitent — en plaçant l'intelligence humaine (individuelle et collective) au cœur de l'intelligence artificielle.

7 Références

- [1] G.A. Boy. An epistemological approach to human systems integration. *Technology in Society Journal*, 102298. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102298>, 2023
- [2] G.A. Boy (Ed.) *Handbook of Sociotechnical Systems: A Human Systems Integration Approach*. Taylor & Francis, CRC, Boca Raton, FL, USA, 2026
- [3] G.A. Boy. Systemic Cognition: Epistemological Clarifications. *Systems Journal*, 14(1), 15; <https://doi.org/10.3390/systems14010015>, 2026
- [4] L. Longo et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI) 2.0: A manifesto of open challenges and interdisciplinary research directions. *Information Fusion*. **106** 102301. arXiv:2310.19775. DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102301, 2024
- [5] G.A. Boy. *Tangible Interactive Systems*. Springer, U.K., 2016
- [6] G.A. Boy. PRODEC: A Method and platform. For Human Systems Integration of Human-AI Teams. Proceedings of the AI4SE & SE4AI Workshop 2024. This fifth annual workshop was sponsored and organized by the U.S. Army DEVCOM Armaments Center Systems Engineering Directorate and the Systems Engineering Research Center and will be hosted at the George Mason University, Arlington Campus, Arlington, VA, USA, 2024
- [7] G.A. Boy. *Orchestrating Human-Centered Design*. Springer, U.K., 2013
- [8] G.A. Boy. Socioergonomics: A few clarifications on the Technology-Organizations-People Triptych. *Proceedings of INCOSE HSI2021 International Conference*, Wiley Online Library, 2021
- [9] <https://artificialintelligenceact.eu>
- [10] D.B. Powel (ed.). Chapter 1 - What Is Model-Based Systems Engineering? *Agile Systems Engineering*, Boston: Morgan Kaufmann, pp. 1–39, ISBN 978-0-12-802120-0, 2016
- [11] https://www.icrc.org/sites/default/files/document/file_list/dih_fr.pdf
- [12] S. Schmäger, I.O. Pappas, & P. Vassilakopoulou. Understanding Human-Centred AI: a review of its defining elements and a research agenda. *Behaviour & Information Technology*. **44** (15): 3771–3810. DOI:10.1080/0144929X.2024.2448719. ISSN 0144-929X, 2025
- [13] G.A. Boy. *Human Systems Integration: From Virtual to Tangible*. CRC Press – Taylor & Francis Group, USA, 2020