

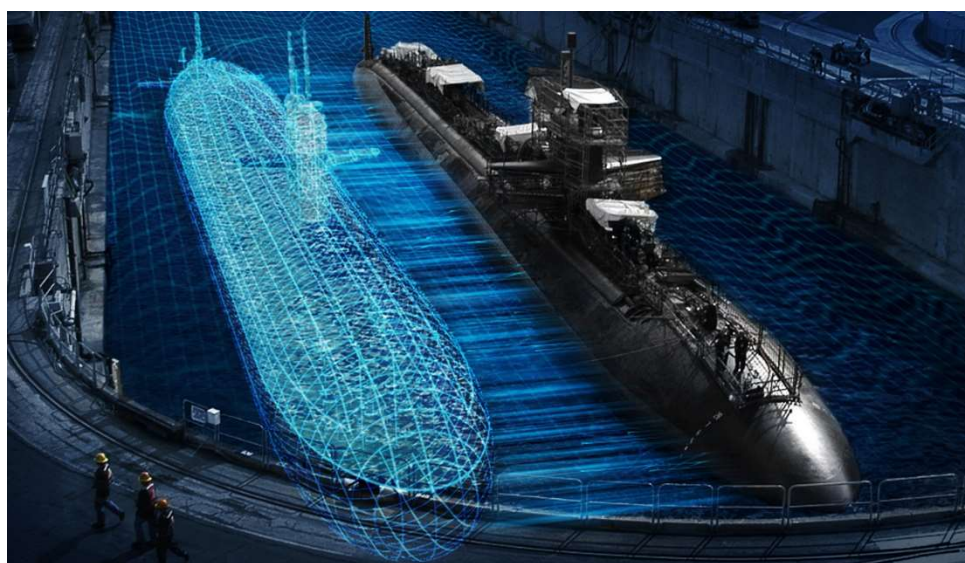


PROMOTION P32

2024-2025

LES JUMEAUX NUMÉRIQUES

Les jumeaux numériques : quelles perspectives pour les forces armées ?



Capitaine de frégate Cédric PEDERSEN

Sous la direction de

Docteur Océane ZUBELDIA

Directrice du domaine « Armement et Economie de Défense », Institut de recherche stratégique de l'Ecole militaire (IRSEM)

Le contenu et les conclusions de ce mémoire reflètent la pensée personnelle de son auteur. Ils n'engagent donc ni la responsabilité de l'Ecole de Guerre, ni celle de l'institution militaire ou du ministère des Armées.

Résumé

Ce mémoire analyse en profondeur le potentiel stratégique des jumeaux numériques pour les forces armées contemporaines, dans un environnement marqué par une accélération technologique inédite. Il transcende une approche purement technique pour interroger leur rôle dans la transformation des paradigmes militaires.

L'architecture du document s'articule autour de trois axes. Le premier retrace l'évolution historique des jumeaux numériques, depuis leur genèse lors de la mission Apollo 13 – où des modélisations rudimentaires ont sauvé l'équipage – jusqu'à leur théorisation par Michael Grieves en 2002. Cette genèse conceptuelle souligne le rôle clé des ruptures technologiques des années 2010 : déploiement à grande échelle de l'Internet des Objets, essor du cloud computing et percées en intelligence artificielle. Ces innovations ont permis la transition de modèles statiques vers des systèmes interactifs traitant des flux de données massifs en temps réel. Une distinction essentielle est établie avec les simulations traditionnelles, soulignant la capacité unique des jumeaux à fusionner modélisation théorique, données instantanées et projection dynamique.

La deuxième partie investigate les applications civiles pionnières, analysant leur transposition potentielle au domaine militaire. L'étude couvre des secteurs clés comme l'industrie manufacturière, où les jumeaux optimisent les chaînes de production, la médecine personnalisée avec des modèles de patients virtuels, ou encore la gestion de villes intelligentes. Chaque cas d'usage fait l'objet d'une évaluation critique quant à son adaptation aux spécificités militaires : exigences de sécurité renforcées, gestion des données classifiées, résilience face aux environnements hostiles. L'analyse révèle notamment comment les méthodes de maintenance prédictive développées dans l'aéronautique civile pourraient révolutionner la disponibilité opérationnelle des flottes militaires, sous réserve d'adaptations de cybersécurité.

La troisième partie cartographie les implications opérationnelles concrètes pour les armées modernes. L'impact des jumeaux numériques est évalué à travers plusieurs applications clés : anticipation des défaillances matérielles en temps réel, réalisme accru des environnements d'entraînement par réalité virtuelle avancée, planification assistée par modèles probabilistes, durcissement des infrastructures numériques via des cybers jumeaux défensifs, agilité dans la conception des futurs programmes d'équipements. L'étude souligne parallèlement les défis persistants : interopérabilité limitée entre systèmes alliés, gestion de la sécurité des données et dilemmes éthiques soulevés par l'automatisation croissante des processus décisionnels.

En conclusion, cette recherche met en exergue le double visage des jumeaux numériques : catalyseur d'efficacité opérationnelle mais aussi source de vulnérabilités. Leur adoption exige une dialectique permanente entre innovation disruptive et préservation des fondamentaux stratégiques. Les armées devront développer des compétences hybrides, combinant maîtrise technologique et agilité doctrinale, pour exploiter pleinement ces outils sans sacrifier leur autonomie décisionnelle. Ce juste équilibre constituera un défi déterminant des prochaines décennies.

Abstract

This thesis provides an in-depth analysis of the strategic potential of digital twins for today's armed forces, in an environment marked by unprecedented technological acceleration. It transcends a purely technical approach to question their role in transforming military paradigms.

The document is structured around three axes. The first traces the historical development of digital twins, from their genesis during the Apollo 13 mission - when rudimentary modelling saved the crew - to their theorization by Michael Grieves in 2002. This conceptual genesis underlines the key role played by the technological breakthroughs of the 2010s: large-scale deployment of the Internet of Things, the rise of cloud computing and breakthroughs in artificial intelligence. These innovations have enabled the transition from static models to interactive systems processing massive data streams in real time. A key distinction is made with traditional simulations, highlighting the unique ability of twins to merge theoretical modeling, instantaneous data and dynamic projection.

The second part investigates pioneering civilian applications, analyzing their potential transposition to the military domain. The study covers key sectors such as manufacturing, where twins optimize production lines, personalized medicine with virtual patient models, and smart city management. Each use case is critically evaluated in terms of its suitability for specific military requirements: heightened security requirements, management of classified data, resilience in the face of hostile environments. In particular, the analysis reveals how predictive maintenance methods developed in civil aeronautics could revolutionize the operational availability of military fleets, subject to cybersecurity adaptations.

The third part maps out the concrete operational implications for modern armies. The impact of digital twins is assessed through several key applications: real-time anticipation of hardware failures, increased realism of training environments through advanced virtual reality, planning aided by probabilistic models, hardening of digital infrastructures via defensive cyber twins, agility in the design of future equipment programs. At the same time, the study highlights persistent challenges: limited interoperability between allied systems, data security management and the ethical dilemmas raised by the increasing automation of decision-making processes.

In conclusion, this research highlights the dual face of digital twins: a catalyst for operational efficiency, but also a source of vulnerabilities. Their adoption requires a permanent dialectic between disruptive innovation and the preservation of strategic fundamentals. Armies will need to develop hybrid skills, combining technological mastery and doctrinal agility, to fully exploit these tools without sacrificing their decision-making autonomy. This balance will be a decisive challenge of the coming decades.

Introduction

L'émergence des jumeaux numériques marque une transformation majeure. Ces doubles virtuels dynamiques, capables de modéliser et d'améliorer continuellement les performances de systèmes physiques élaborés, bouleversent les paradigmes industriels traditionnels. Les études prospectives estiment le marché mondial à 36 milliards de dollars en 2025, avec un taux de croissance annuel prévisionnel de 38 % jusqu'en 2030¹. Une telle accélération révèle le rôle pivot d'une technologie aux applications plurisectorielles, englobant aussi bien la production industrielle, les innovations médicales, les réseaux énergétiques que les infrastructures de transport.

Confrontées à cette dynamique accélérée, les armées doivent concilier une exigence contradictoire : moderniser leurs dispositifs techniques sans compromettre le volume de leurs forces, dans un contexte de contraintes budgétaires croissantes. Cette tension structurelle soulève des enjeux techniques et doctrinaux fondamentaux. Les jumeaux numériques constituent une réponse équilibrée, entre nécessité d'agilité et impératifs de résilience, grâce à une reproduction minutieuse des équipements militaires et une modélisation de leurs interactions en environnement hétérogène. Leur potentiel transformateur suscite un vif enthousiasme, particulièrement pour optimiser les cycles de maintenance, renforcer l'authenticité des simulations tactiques et concevoir rapidement de nouveaux programmes d'armement. Cependant, leur adoption demande des adaptations structurelles et conceptuelles.

La révolution technologique s'accompagne de défis géostratégiques sans précédent. Confrontées à des théâtres hybrides intégrant cybermenaces et drones autonomes, les armées recherchent des instruments pour conserver leur supériorité grâce à une plus grande agilité. Ces gains masquent pourtant une tension fondamentale entre innovation technologique et impératifs sécuritaires inhérents aux systèmes d'armement. L'adoption militaire de ces outils virtuels s'avère ainsi paradoxale, nécessitant l'intégration de données hétérogènes souvent dispersées entre différents systèmes, tout en préservant la robustesse des architectures militaires.

L'autonomie stratégique émerge comme enjeu central. La création de jumeaux numériques militaires exige de concilier souveraineté technologique et interopérabilité OTAN, dans un environnement géostratégique où la maîtrise des données devient un facteur clé de puissance. Cette opposition traduit les réalités géopolitiques modernes, où la domination stratégique dépend autant du contrôle des informations et des modèles algorithmiques que des opérations sur le terrain.

L'utilisation croissante de ces répliques virtuelles, dopés à l'intelligence artificielle (IA), remet en cause certains principes éthiques fondamentaux de l'engagement militaire. La supplantation graduelle de l'expertise humaine par des outils prédictifs alimente des interrogations majeures concernant l'imputabilité des décisions. Ces controverses transcendent les aspects techniques pour toucher à l'essence même de la prise de décision en contexte conflictuel.

Ce travail articule une étude comparée des politiques nationales (États-Unis, Royaume-Uni, France) à un examen global des synergies entre jumeaux numériques et innovations technologiques connexes. Cette double perspective permettra d'identifier les synergies potentielles, tout en éclairant les conditions d'une adoption responsable et efficace.

Le principal écueil méthodologique réside dans le caractère sensible des données militaires, empêchant l'accès à certaines sources. Une autre difficulté réside dans le peu de littérature traitant des applications militaires des jumeaux numériques. Pour y pallier, l'étude privilégiera les sources ouvertes en les validant si possible par recoupements multiples. Le caractère évolutif des technologies impose une vigilance accrue dans l'interprétation des résultats.

La transposition, l'intégration et l'utilisation des jumeaux numériques au sein des armées soulèvent donc de nombreuses questions. Comment appliquer à la sphère de défense des technologies initialement conçues pour l'industrie civile, tout en respectant les spécificités doctrinales et sécuritaires du fait

¹ MORDOR INTELLIGENCE, date non communiquée. Digital Twin Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2025-2030). In : Mordor Intelligence [en ligne]. Disponible sur : <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/digital-twin-market>

militaire ? Quel arbitrage entre les gains d'efficacité opérationnelle et les vulnérabilités induites, notamment face aux cybermenaces susceptibles de corrompre le couplage réel/virtuel ? Comment éviter une dépendance technologique extraterritoriale tout en développant des standards interopérables avec nos partenaires ? Jusqu'à quel point l'automatisation permise par ces outils virtuels peut-elle se substituer au jugement stratégique des décideurs humains sans éroder la responsabilité opérationnelle ?

Ce mémoire propose de dépasser une vision purement technique des jumeaux numériques pour interroger leur rôle dans une reconfiguration plus profonde des paradigmes militaires contemporains : intégration multi-milieus multi-champs (M2MC), connectivité permanente, accélération de la boucle OODA (Observer-Orienter-Décider-Agir), adaptation aux menaces hybrides.

Ce mémoire s'articule autour de trois volets complémentaires. Le premier volet interroge les origines théoriques des jumeaux numériques, en examinant leurs singularités par rapport aux méthodes de simulation conventionnelles. Une attention particulière est accordée aux éléments technologiques structurants : internet des objets, plateformes cloud et intelligence artificielle.

La section suivante évalue les usages civils de ces outils à travers des secteurs clés (industrie, technologies médicales, logistique, transport), en explorant leur transférabilité vers les applications militaires. Cette démarche met en évidence les adaptations indispensables pour répondre aux impératifs militaires, tout en pointant les écueils liés à l'importation de modèles conçus pour des contextes non opérationnels.

Le dernier chapitre aborde les implications concrètes des jumeaux numériques dans l'écosystème militaire. L'étude s'attache successivement à leur influence sur la préparation opérationnelle, la gestion préventive des équipements, l'optimisation de la planification des opérations la sécurisation des architectures numériques et la conception des équipements. L'impact budgétaire, les questionnements éthiques, les défis de gouvernance et les mutations technologiques en cours y sont analysés.

Par cette approche progressive, le travail vise à décrypter l'impact des jumeaux numériques sur les pratiques militaires modernes, tout en ouvrant des perspectives pour articuler progrès technologique et impératifs opérationnels.

1 Comprendre les jumeaux numériques

1.1 Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?

1.1.1 Origine et évolution du concept de jumeau numérique.

Un « jumeau numérique » désigne une représentation virtuelle d'un objet physique, d'un système ou d'un processus, qui permet de le modéliser avec précision. Le jumeau numérique se nourrit des capteurs de l'objet réel et une communication s'établit entre l'objet et sa simulation virtuelle. Ce concept, bien que relativement récent dans sa terminologie, trouve ses prémices dans les années 1960. La mission Apollo 13 de la NASA en 1970 est souvent considéré comme un embryon de jumeau numérique. Pendant le vol, une explosion à bord du module de service menaçait la suite de la mission et la survie de l'équipage. Les ingénieurs au sol ont alors utilisé des modèles physiques du vaisseau spatial pour simuler les conditions à bord et tester des solutions pour résoudre l'avarie. Cette approche a permis de ramener l'équipage sain et sauf.² Si cette méthode ne correspond pas aux jumeaux numériques actuels – fondés sur des données dynamiques –, elle en incarne une préfiguration conceptuelle clé.

Dans les décennies qui ont suivi la mission Apollo 13, les ingénieurs et chercheurs ont progressivement intégré des modèles numériques plus avancés dans leurs processus de conception et d'exploitation. L'introduction de la conception assistée par ordinateur (CAO) dans les années 1980 a constitué une étape clé vers la création de véritables jumeaux numériques, en permettant une visualisation plus fine et dynamique des systèmes complexes³.

La formalisation théorique intervient en 2002 lors d'un séminaire à l'Université du Michigan, où Michael Grieves introduit le concept de *digital twin*. Il cherche à optimiser le cycle de vie des produits. L'idée initiale était de créer une réplique virtuelle pour analyser son comportement et optimiser sa fabrication, sa maintenance et son utilisation. Ses travaux conceptualisent une représentation virtuelle dynamique alimentée par des flux de données multi-sources. Cette vision anticipatrice trouve un écho limité jusqu'à ce que trois avancées majeures transforment radicalement le concept des années 2010⁴ :

- L'Internet des Objets (*Internet of Things* - IoT) : le déploiement massif de capteurs connectés permet une collecte de données temps réel⁵ ;
- Le cloud computing : l'essor des infrastructures distribuées (Amazon Web Services ou Microsoft Azure par exemple) fournit les capacités de stockage et de traitement nécessaires aux modèles complexes ;
- L'intelligence artificielle : les algorithmes de *deep learning* permettent l'analyse prédictive des flux de données.

Cela a permis de passer de simples modèles statiques à des systèmes interactifs capables d'exploiter d'énormes quantités de données en temps réel. Ces différentes notions seront développées dans la suite de cette étude. Les jumeaux numériques ne se contentent ainsi plus d'analyser des équipements individuels, mais modélisent actuellement des processus, des infrastructures, voire des écosystèmes entiers.

Pour ne citer qu'un exemple parmi d'autres, l'industrie 4.0 a ainsi vu une adoption massive de cette technologie, notamment dans l'optimisation des chaînes de production et la maintenance prédictive.

² SIEMENS, 14 avril 2020, *Apollo 13: The first digital twin*. In : Simcenter Blog [en ligne]. Disponible sur <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>

³ SOLIDWORKS, 10 octobre 2024, *L'histoire de la CAO : de la planche à dessin à la révolution numérique*. In : SolidWorks Blog [en ligne]. Disponible sur <https://blogs.solidworks.com/solidworksfrance/2024/10/lhistoire-de-la-cao-de-la-planche-a-dessin-a-la-revolution-numerique.html>

⁴ GRIEVES, Michael, 2014. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. In : 3DS [en ligne]. Disponible sur : <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>

⁵ HTEC Group, date non communiquée. *Digital Twins in IoT: Past, Present, and Future*. In : HTEC Group [en ligne]. Disponible sur : <https://htec.com/insights/blogs/digital-twins-in-iot/>

General Electric⁶ et Siemens⁷ figurent parmi les pionniers dans le domaine industriel, en développant des jumeaux numériques pour superviser des turbines, des locomotives et des réseaux énergétiques, améliorant ainsi la durabilité et l'efficacité des opérations. Les entreprises obtenant de vrais gains de performance, les secteurs d'application des jumeaux numériques se multiplient.

Dans le domaine industriel, ils sont utilisés pour la maintenance prédictive, la conception de produits et l'optimisation des chaînes de production. Dans le secteur de la santé, des modèles personnalisés sont créés pour tester des traitements sur des « patients virtuels ». Le concept de jumeau numérique s'impose comme un outil incontournable, avec un marché mondial estimé à 36,19 milliards de dollars en 2025 et une croissance annuelle prévue de 37,87% jusqu'en 2030⁸ selon Mordor Intelligence. Les prévisions de MarketsandMarkets⁹ indiquent quant à elles un marché mondial estimé à 110 milliards de dollars d'ici 2028, avec un taux de croissance annuel bien plus grand de 61,3% entre 2023 et 2028. Sans rentrer dans une bataille de chiffres, cela montre le fort engouement que suscite les jumeaux numériques.

1.1.2 Une appréciation erronée : jumeaux numériques vs simulations et modélisations traditionnelles.

Les jumeaux numériques, les simulations et les modélisations classiques sont fréquemment assimilés à tort. Pourtant, ces trois approches présentent des différences fondamentales dans leur essence et leurs fonctionnalités.

La modélisation conventionnelle repose sur l'élaboration de maquettes mathématiques ou graphiques d'un système. Ces modèles statiques offrent la possibilité d'examiner des comportements spécifiques dans des situations préétablies. En guise d'exemple, une modélisation 3D d'un moteur permet de visualiser son architecture ou d'analyser ses contraintes mécaniques, sans toutefois tenir compte des variations dynamiques de son fonctionnement réel.

Les simulations approfondissent l'analyse en y incorporant un aspect dynamique et temporel. Ces dernières permettent d'étudier le comportement d'un système dans des conditions particulières, à l'image des tests d'aérodynamisme réalisés sur les véhicules. Toutefois, leur capacité reste limitée par la nécessité d'utiliser des paramètres préétablis et fixes, ce qui les empêche de s'adapter en temps réel aux variations du système examiné¹⁰.

En comparaison, le jumeau numérique constitue une véritable révolution face aux méthodes traditionnelles. Loin de se limiter à des modèles figés ou à des simulations ponctuelles, il s'agit d'une copie digitale d'un système physique, nourrie en permanence par des données transmises instantanément via des capteurs. Ce lien vivant entre réel et virtuel offre une surveillance en continu : on observe l'état actuel du système, on prévoit ses futurs comportements, et on affine son rendement en direct. Contrairement aux simulations, cantonnées à des hypothèses prédéfinies, les jumeaux numériques embarquent une vision évolutive, suivant le système de sa naissance à sa fin de vie. Dans l'aéronautique, un avion équipé d'un jumeau numérique capte en temps réel les vibrations des moteurs, l'érosion des pièces clés, ou même les aléas météorologiques. Ces informations permettent de déceler une panne potentielle des semaines à l'avance, organisant une maintenance préventive avant que la situation ne soit critique. La faculté à anticiper les pannes apporterait une plus-value indéniable sur un sous-marin

⁶ GE VERNOVA, date non communiquée, *Digital Twin Technology*. In : GE Vernova [en ligne]. Disponible sur <https://www.gevernova.com/software/innovation/digital-twin-technology>

⁷ SIEMENS, date non communiquée, *Getting the best out of production with the Digital Twin*. In : Siemens [en ligne]. Disponible sur <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/digital-enterprise/digital-transformers/electronics-factory-erlangen/digital-twin.html>

⁸ MORDOR INTELLIGENCE, date non communiquée. *Digital Twin Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2025-2030)*. In : Mordor Intelligence [en ligne]. Disponible sur : <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/digital-twin-market>

⁹ MARKETSANDMARKETS. *Digital Twin Market - Global Forecast to 2026, 2021*. Disponible sur : <https://marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html>

¹⁰ CNRS, 6 juillet 2024, *L'essor des jumeaux numériques face à leurs défis*. In : CNRS Actualités [en ligne]. Disponible sur : <https://www.cnrs.fr/fr/actualite/lessor-des-jumeaux-numeriques-face-leurs-defis>

nucléaire où la sûreté impose des échéanciers de maintenance exigeants. Ces maintenances prédictives permettraient d'assouplir fortement ces contraintes.

Les jumeaux numériques se démarquent par leur capacité à fusionner modélisation, simulation et données instantanées. Si les méthodes classiques restent utiles pour des analyses ciblées, ils proposent une vision évolutive, épousant en temps réel les mutations d'un système, de sa conception à son exploitation.¹¹ L'émergence des jumeaux numériques repose sur la convergence de plusieurs technologies clés, formant un écosystème qui permet la création et l'exploitation de ces doubles virtuels. Parmi ces piliers technologiques, trois se distinguent par leur rôle fondamental : l'Internet des Objets (IoT), l'intelligence artificielle, et le cloud computing.

1.2 Les technologies sous-jacentes

1.2.1 Le rôle de l'Internet des objets (IoT) dans la collecte de données.

L'IoT (*Internet of Things*) sert de socle aux jumeaux numériques en reliant sans interruption les équipements physiques à leurs doubles virtuels. Par des réseaux IP adaptés, il connecte des objets équipés de capteurs, créant un échange permanent entre le monde réel et ses modèles digitaux¹². Sans ce lien dynamique, les jumeaux perdraient leur utilité opérationnelle.

Son application dans le domaine militaire soulève une problématique cruciale : comment concilier l'exploitation massive de données en temps réel avec les impératifs de sécurité et de résilience propres au domaine de la défense ? Cette question s'avère particulièrement pertinente dans un contexte où la fiabilité et l'intégrité des flux d'information conditionnent directement l'efficacité opérationnelle.

Les jumeaux numériques ne peuvent fonctionner correctement sans un flux constant d'informations régulièrement mises à jour et fiables. Pour y parvenir, l'IoT s'appuie sur un réseau dense de capteurs capables de relever des paramètres physiques clés. Prenons le cas concret d'un blindé moderne : ses capteurs surveillent en temps réel l'érosion des chenilles et les fluctuations de chaleur au niveau du moteur. Ces mesures, transmises au jumeau numérique, construisent une représentation précise de l'état réel du véhicule.

Cette omniprésence des capteurs IoT n'est pas sans risques. La multiplication des points de collecte élargit la surface d'attaque potentielle pour des adversaires cherchant à altérer les données. Les armées modernes doivent donc déployer des architectures sécurisées combinant chiffrement robuste et mécanismes d'authentification renforcés, tout en maintenant une veille active sur les vulnérabilités émergentes.

Les architectures IoT récentes incluent désormais l'edge computing, permettant de renforcer la résilience des systèmes. Il s'agit d'un traitement local des données directement sur les capteurs qui permet de réduire la dépendance aux centres de calcul distants. En limitant les transferts d'informations sensibles, cette innovation renforce la sécurité des systèmes militaires et constitue une avancée majeure pour les opérations en milieu hostile où la connectivité reste aléatoire¹³.

Les progrès technologiques laissent entrevoir des capteurs IoT toujours plus compacts et résistants. Ces évolutions permettront à terme d'équiper des micro-drones ou des dispositifs de surveillance discrète, élargissant le champ d'application des jumeaux numériques militaires à des échelles encore inédites. L'Ukraine a produit plus d'un million de petits drones en 2024, principalement des modèles

¹¹ SIEMENS, 28 mars 2023, *Remplacer les prototypes physiques par le jumeau numérique*. In : Air & Cosmos [en ligne]. Disponible sur : <https://air-cosmos.com/article/siemens-remplacer-les-prototypes-physiques-par-le-jumeau-numerique-68329>

¹² THERMOS Alicia, 13 mars 2024. Jumeaux numériques : concept et applications. In : Kuzzle Blog [en ligne]. Disponible sur : <https://blog.kuzzle.io/fr/jumeaux-numeriques-iot>

¹³ FRANCE STRATÉGIE, février 2022. Le monde de l'Internet des objets : des dynamiques à maîtriser. In : France Stratégie [en ligne]. Disponible sur : <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2022-rapport-iot-fevrier.pdf>

FPV (first-person view) capables de livrer des explosifs jusqu'à 20 km de distance¹⁴. Ces drones sont équipés de modules de navigation indépendants du GPS et de canaux de communication multi-fréquences pour contrer les efforts de guerre électronique russes.

Par ailleurs, l'interopérabilité reste un défi majeur dans l'adoption de l'IoT militaire. La coexistence de protocoles hétérogènes complique l'intégration des données issues d'équipements de différents fournisseurs. Des initiatives comme le programme européen EDIDP¹⁵ visent à harmoniser ces standards, notamment pour les projets d'armement collaboratifs où la compatibilité des systèmes est cruciale.

1.2.2 L'intégration de l'intelligence artificielle et du machine learning pour l'analyse prédictive.

Les jumeaux numériques atteignent leur plein potentiel grâce à l'apport combiné de l'Intelligence Artificielle (IA) et du *Machine Learning* (ML). Ces technologies servent de catalyseur en traitant les flux massifs de données issues des capteurs pour en extraire des signaux prédictifs. Par exemple, un jumeau numérique dédié à un moteur d'hélicoptère peut repérer des anomalies vibratoires infimes, comparant ces motifs à des milliers d'heures de données historiques. Cette capacité à relier passé et présent permet d'anticiper des scénarios critiques bien avant leur apparition¹⁶. En fait, jumeaux numériques et intelligence artificielle s'inscrivent dans un cercle vertueux, les jumeaux numériques étant considérés comme une « technologie de déclenchement de l'innovation » avec une maturité qui sera atteinte d'ici 5 à 10 ans¹⁷, comme l'illustre la figure ci-dessous produite par Gartner, l'un des principaux organismes de recherche et de conseil au monde.

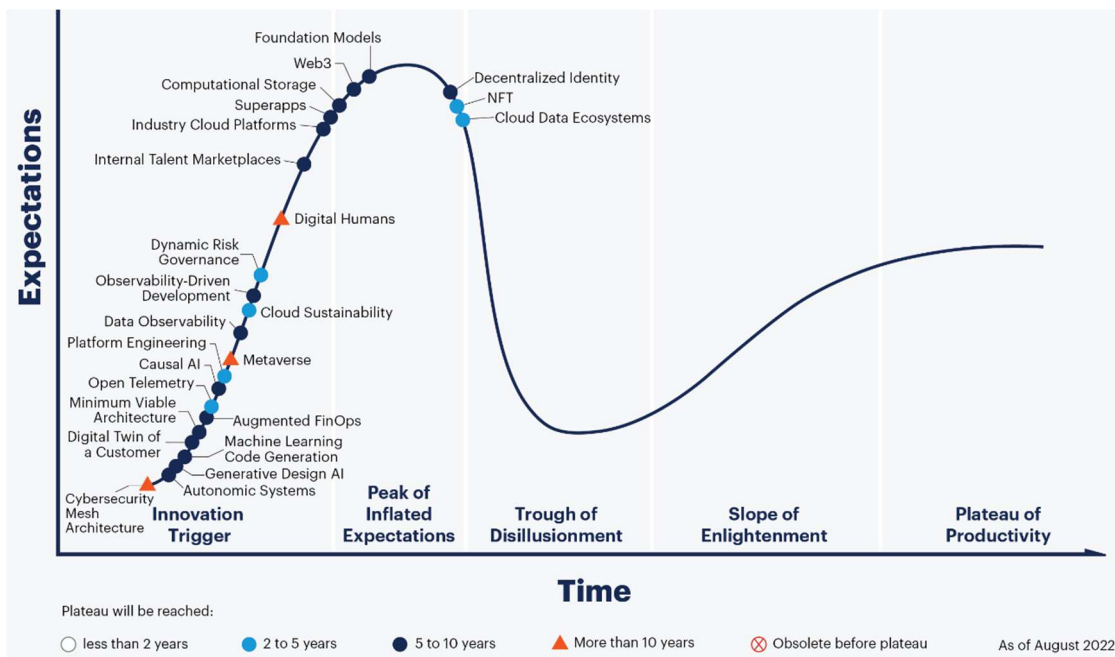


Figure 1 : Cycle de déclenchement de l'innovation¹⁸

¹⁴ TECHUKRAINE, 8 janvier 2025. Ukraine's Drone Revolution: AI-Powered, EW-Resistant, and Fiber Optic Innovations. In : TechUkraine [en ligne]. Disponible sur : <https://techukraine.org/2025/01/08/ukraines-drone-revolution-ai-powered-ew-resistant-and-fiber-optic-innovations/>

¹⁵ European Defence Industrial Development Programme

¹⁶ JULIEN Nathalie, MARTIN Eric, *Le jumeau numérique, de l'intelligence artificielle à l'industrie agile*, Malakoff, Dunod, 2020, 232 p., p 95-96.

¹⁷ CENJOWS, 9 janvier 2025. Digital Transformation in Joint Warfighting- A 'Digital Twin' Use Case. In : Centre for Joint Warfare Studies [en ligne]. Disponible sur : <https://cenjows.in/digital-transformation-in-joint-warfighting-a-digital-twin-use-case/>

¹⁸ GARTNER (PERRI, Lori), 10 août 2022. Quelles sont les nouveautés du Hype Cycle 2022 de Gartner consacré aux technologies émergentes ? In : Gartner [en ligne]. Disponible sur : <https://www.gartner.fr/fr/articles/quelles-sont-les-nouveautes-du-hype-cycle-2022-de-gartner-consacre-aux-technologies-emergentes>

Ainsi, l'US Air Force utilise l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique pour prévoir les problèmes d'équipement avant qu'ils ne surviennent. Grâce à cette approche, elle a observé une réduction de 40% des maintenances non planifiées sur les sous-systèmes d'aéronefs prioritaires¹⁹. De même, l'armée américaine a enregistré une diminution de 24% des dysfonctionnements graves en vol, démontrant ainsi l'impact transformateur de l'IA et du *machine learning* sur la maintenance prédictive dans le domaine militaire.

La vraie rupture réside dans le passage d'une logique réactive à une logique proactive. Traditionnellement, les systèmes de surveillance alertent lors d'un dépassement de seuil. Avec le ML, le jumeau numérique identifie des écarts subtils – une légère augmentation de la température sur une pale de rotor, une fréquence vibratoire inhabituelle – qui, cumulés, prédisent une panne plusieurs jours à l'avance. Cette granularité transforme la maintenance : on répare non plus parce qu'une pièce est usée, mais parce que les données indiquent qu'elle le sera.

L'apprentissage continu donne à ces systèmes une dimension évolutive. Chaque mission enrichit le modèle, affinant ses prédictions. Un algorithme entraîné sur des données de vol en milieu désertique développera des critères différents de celui exposé à un environnement maritime – une adaptabilité cruciale pour les forces armées déployées sur des théâtres variés.

Le ML améliore constamment la fiabilité des jumeaux numériques. Ces systèmes évoluent en continu, s'enrichissant de chaque nouvelle donnée collectée. Cette adaptation permanente affine leur aptitude à repérer les irrégularités et à perfectionner leur fonctionnement. Les réseaux de neurones profonds, en particulier, excellent dans l'analyse combinée de données variées. Ils traitent aussi bien les informations structurées provenant des capteurs que les données non structurées comme les rapports techniques, offrant ainsi une compréhension plus complète du système modélisé²⁰.

Néanmoins, cette puissance s'accompagne d'écueils. Les biais des jeux de données d'entraînement – comme la sous-représentation de conditions climatiques extrêmes – peuvent fausser les prédictions. Par ailleurs, la complexité croissante des modèles de *deep learning* rend leur interprétation difficile, posant des défis éthiques et opérationnels. La sécurisation de ces flux de données sensibles contre les cybermenaces reste également une priorité absolue.

En dépit de ces défis, la synergie entre jumeaux numériques et IA ouvre de nouvelles perspectives stratégiques qui redéfinissent les paradigmes de la prise de décision militaire. Les systèmes apprenants permettront demain de simuler des centaines de scénarios en parallèle – défaillances techniques, réactions adverses, conditions environnementales – pour optimiser les décisions en temps réel. Cette capacité à explorer simultanément des arborescences de possibles constitue une rupture majeure : elle substitue à la logique déterministe traditionnelle une approche probabiliste.

Une révolution qui exige toutefois de maintenir l'humain au cœur du processus, non pas comme simple validateur *a posteriori*, mais comme architecte des modèles éthiques encadrant les algorithmes. Les récents débats sur les biais des IA de ciblage montrent que l'expertise humaine doit irriguer chaque couche décisionnelle - de la conception des jumeaux à l'interprétation des sorties algorithmiques. Le système Lavender déployé par l'armée israélienne²¹, qui a marqué des dizaines de milliers de Gazaouis comme cibles potentielles sur la base de similarités algorithmiques avec des militants connus, a révélé des biais lorsque la supervision humaine s'est limitée à une vérification trop sommaire, entraînant des erreurs de frappes. Cet équilibre entre optimisation technologique et garde-fous humains dessine un nouvel objectif pour les armées, où la légitimité opérationnelle dépendra de la transparence des mécanismes prédictifs et de leur alignement avec le droit international revisité à l'aune de l'IA.

¹⁹ DEFENSE INNOVATION UNIT, pas de date. Predictive Maintenance. In : DIU Product Catalog [en ligne]. Disponible sur : <https://www.diu.mil/solutions/portfolio/catalog/a0Tt0000009En6aEAC-a0ht000000AYgyGAAT>

²⁰ LE JOURNAL DU NET, 15 mars 2023, *Les jumeaux numériques dans l'industrie manufacturière : une révolution pour les lignes de production*. In : Le Journal du Net [en ligne]. Disponible sur <https://www.journaldunet.com/iot/1538281-jumeaux-numeriques-dans-l-industrie-manufacturiere-une-revolution-pour-les-lignes-de-production/>

²¹ +972 MAGAZINE, 25 avril 2024. 'Lavender': The AI machine directing Israel's bombing spree in Gaza. In : +972 Magazine [en ligne]. Disponible sur : <https://www.972mag.com/lavender-ai-israeli-army-gaza/>

1.2.3 Utilisation du cloud computing pour le stockage et le traitement des données.

Le cloud computing s'est imposé comme une solution essentielle pour les jumeaux numériques. Il répond à leurs exigences de stockage et de traitement d'une grande quantité de données. Cette technologie permet d'utiliser des ressources délocalisées – serveurs, bases de données, outils d'analyse – sans nécessité de disposer d'équipements physiques onéreux. Hébergées dans des centres spécialisés accessibles à distance, ces ressources procurent une adaptabilité indispensable aux jumeaux numériques, dont les besoins évoluent constamment. Le programme CIRRUS du ministère britannique de la Défense illustre cette dynamique²² : déployé sur des infrastructures multicloud sécurisées, il permet depuis 2024 de migrer 400 charges de travail classifiées vers le cloud public tout en rationalisant les centres de données obsolètes.

La valeur stratégique du cloud réside dans sa capacité à mutualiser des ressources selon les besoins. Prenons l'exemple d'un jumeau numérique dédié à un système aéronautique : chaque mission génère des flux continus de données (pression des turboréacteurs, vibrations structurales, conditions environnementales, etc.). Le cloud permet de stocker ces données tout en exécutant des simulations complexes, comme l'usure prédictive de composants critiques. Il stocke ces données le temps nécessaire à l'exploitation puis est en mesure de libérer l'espace selon les règles édictées.

L'élasticité des ressources constitue un avantage majeur. Contrairement aux serveurs locaux aux capacités figées, le cloud ajuste automatiquement la puissance de calcul et l'espace de stockage. Cette adaptabilité est cruciale pour des applications militaires dont les exigences fluctuent selon les scénarios. Par ailleurs, la collaboration illustre un autre atout du cloud.

L'externalisation via le cloud évite également des coûts initiaux élevés. Une infrastructure locale équivalente nécessite souvent des investissements à plusieurs millions d'euros, redirigés vers des innovations techniques grâce au modèle cloud. Cependant, cette ouverture comporte des risques majeurs. Les données sensibles des systèmes militaires – spécifications techniques, logs opérationnels – exigent des garanties de sécurité absolue. Des paramètres techniques de drones, stockés sans chiffrement renforcé, pourraient ainsi être accessibles à des tiers non autorisés. Pour répondre à ces enjeux, des solutions hybrides ou des clouds souverains sont souvent privilégiés, combinant la flexibilité du cloud avec des niveaux élevés de sécurité. Pour garantir son indépendance technologique, la France développe des infrastructures nationales d'IA pour permettre son utilisation dans le domaine sensible des armées. Cela inclut la création de centres de données souverains, hébergés sur le territoire national et la gestion sécurisée des données critiques à l'échelle nationale. Le ministre des Armées a annoncé en octobre 2024 la sélection de Hewlett Packard pour fournir un supercalculateur dédié à l'IA au sein de l'AMIAD²³. Ce supercalculateur sera installé au Mont-Valérien, à Suresnes, en France.

En synthèse, le cloud computing offre aux jumeaux numériques une agilité opérationnelle inédite. Toutefois, son déploiement dans un contexte militaire exige une gouvernance rigoureuse, équilibrant mutualisation des ressources et contrôle souverain des données. Cela nécessite une bonne connaissance des différents types de jumeaux numériques.

1.3 Les typologies des jumeaux numériques

On distingue trois grandes catégories de jumeaux numériques : produits, processus et systèmes²⁴. Chacune répond à des besoins industriels particuliers et offre des perspectives d'optimisation uniques.

²² UK GOVERNMENT, 2025. *Cloud Strategic Roadmap for Defence*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.gov.uk/government/publications/cloud-strategic-roadmap-for-defence/cloud-strategic-roadmap-for-defence>

²³ RIOUX Philippe, 28/10/2024, *Que sait-on sur le supercalculateur le plus puissant dédié à l'intelligence artificielle que construit la France ?*, In : La Dépêche [en ligne]. Disponible sur <https://www.ladepeche.fr/2024/10/28/un-coup-de-grace-que-sait-on-sur-le-supercalculateur-le-plus-puissant-dedie-a-lintelligence-artificielle-que-construit-la-france-12287529.php>

²⁴ JULIEN Nathalie, MARTIN Eric, *Le jumeau numérique, de l'intelligence artificielle à l'industrie agile*, Malakoff, Dunod, 2020, 232 p., p 30.

Les jumeaux de produits sont des modèles virtuels d'objets réels qui étudient un produit tout au long de sa vie. Ils aident à la conception, aux tests et à l'entretien. Dans l'industrie automobile, le double numérique d'un véhicule anticipe ses performances avant sa fabrication. Cette approche permet de prévoir les problèmes potentiels, d'améliorer l'efficacité et de réduire les coûts de développement.

Les jumeaux de processus copient des chaînes de production ou des méthodes de travail. Ils servent notamment à trouver les faiblesses et tester des améliorations sans perturber le réel. Une usine peut ainsi explorer de nouvelles organisations pour gagner en efficacité. Ces jumeaux permettent d'optimiser les flux, de réduire les temps d'arrêt et d'améliorer la qualité globale de la production.

Les jumeaux de systèmes englobent plusieurs produits et processus liés. Ils donnent une vue d'ensemble, comme pour une usine entière ou un réseau de transport. Cette approche favorise la gestion intégrale tout en prenant en compte les interactions entre les différentes composantes. Les jumeaux numériques permettent de prédire les pannes, d'améliorer l'exploitation des ressources et de renforcer la robustesse globale des infrastructures. Il faut cependant bien cadrer le juste besoin pour ne pas arriver à des solutions au coût exorbitant. Ainsi, l'apport est indéniable pour les infrastructures critiques, mais son universalisation requiert une maturité technologique et organisationnelle que peu d'acteurs militaires ou industriels possèdent aujourd'hui.

En résumé, ces instruments optimisent la conception, la production et la gestion de systèmes complexes. Ils s'adaptent aux particularités de chaque domaine industriel, fournissant des analyses et optimisations sur mesure. Les jumeaux numériques transforment le processus de création, de fabrication et d'entretien des actifs par les entreprises, ouvrant la voie vers une industrie plus efficace, flexible et durable.

1.4 Les niveaux de maturité et d'intégration des jumeaux numériques.

L'évolution des jumeaux numériques s'organise en trois paliers technologiques distincts : le modèle numérique (ou « miroir numérique »), l'ombre numérique, et le jumeau numérique abouti, véritable système cyber-physique²⁵. Chaque palier traduit une amélioration des interactions entre entité physique et réplique virtuelle, portant sur la qualité des connexions, la rapidité des réponses et la complexité des échanges.

1.4.1 Premier niveau : le modèle numérique

Une première étape consiste en une représentation virtuelle figée d'un objet ou système réel. L'outil offre la possibilité de représenter et d'analyser divers scénarios au sein d'un univers virtuel, sans accès à des informations temps réel provenant du terrain. Imaginons un rotor d'hélicoptère numérisé en trois dimensions : les équipes techniques peuvent évaluer sa tenue mécanique sous des forces externes en conditions extrêmes. Les essais virtuels demeurent cependant isolés de la réalité physique, aucun capteur embarqué ne transmettant de données opérationnelles. Ces modèles figés trouvent principalement leur utilité lors des étapes préliminaires de développement, ou pour affiner des prototypes en phase de pré-production.

1.4.2 Deuxième niveau : l'ombre numérique

Le second stade introduit un lien à sens unique entre l'objet réel et sa copie virtuelle. Des capteurs embarqués sur le système physique recueillent en permanence des données opérationnelles – températures, vibrations, niveau d'usure – et les transmettent au modèle numérique pour une actualisation constante. Cependant, ce flux d'informations reste unidirectionnel : les changements effectués dans le modèle virtuel n'agissent pas sur le système physique. Illustrons cela avec une turbine éolienne : son ombre numérique affiche en temps réel sa production d'énergie et son degré d'usure, mais toute modification de ses paramètres (réglage des pales, vitesse de rotation) nécessite encore une intervention humaine. Ce deuxième niveau apporte déjà de beaux résultats. Les ingénieurs de Vattenfall

²⁵ CNRS, *op. cit.*

ont constaté que l'usure réelle des turbines était inférieure aux prévisions initiales²⁶. Grâce à cette surveillance continue via l'ombre numérique, ils ont pu démontrer qu'une structure conçue à l'origine pour une durée de vie de 25 ans pouvait en réalité fonctionner jusqu'à 45 ans ou plus.



Figure 2 - représentation d'une ombre numérique d'une éolienne²⁷

1.4.3 Troisième niveau : le jumeau numérique complet

Ce niveau ultime instaure un dialogue bidirectionnel entre réel et virtuel. Le jumeau numérique exploite des technologies avancées (IA, IoT) pour simuler des scénarios complexes, anticiper des défaillances et proposer des corrections automatisées au système physique. Par exemple, un réseau électrique intelligent doté d'un tel jumeau pourrait ajuster de manière dynamique sa distribution d'énergie en fonction des prévisions de consommation, évitant les surcharges. Ces capacités prédictives et adaptatives surpassent largement celles des niveaux antérieurs.

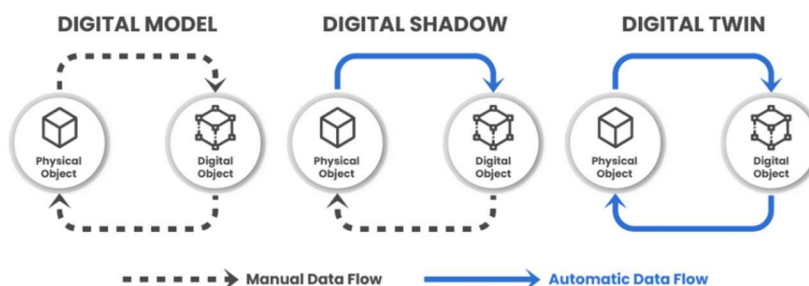


Figure 3 : modèle numérique, ombre numérique et jumeau numérique²⁸

Si des secteurs comme l'aéronautique (optimisation de moteurs) ou l'automobile (simulations de crash-tests) exploitent déjà des jumeaux avancés, d'autres domaines (BTP, agroalimentaire) se cantonnent souvent aux modèles statiques ou aux ombres numériques. Cette disparité reflète autant des défis techniques (intégration de capteurs, traitement massif de données) que des contraintes économiques (coûts d'infrastructure, retour sur investissement).

L'analyse des fondements des jumeaux numériques dévoile leur capacité à révolutionner divers domaines. Avant d'aborder leur intégration militaire, un examen de leurs usages civils s'impose, ces derniers étant dans un stade d'application plus avancée. Cette étape éclairera les enjeux et opportunités dans un cadre opérationnel. Les avancées du secteur privé, notamment dans l'industrie et la santé, ont posé les jalons des applications militaires en prouvant l'aptitude des jumeaux à affiner les processus et la prise de décision. L'étude de ces cas civils enrichira notre compréhension des ajustements requis pour le contexte militaire, où les contraintes diffèrent sensiblement. Ainsi, cette transition du civil au militaire révélera les défis spécifiques à surmonter pour une adoption réussie au sein des forces armées.

²⁶ VATTENFALL, 2024. Digital twins – a road to more profitable offshore wind. In : Vattenfall [en ligne]. Disponible sur : <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2024/digital-twins--a-road-to-more-profitable-offshore-wind>

²⁷ Id.

²⁸ VIDYATEC, date non mentionnée. The 4 Levels of the Digital Twin Technology. In : Vidyatec Blog [en ligne]. Disponible sur : <https://vidyatec.com/blog/the-4-levels-of-the-digital-twin-technology/>

2 Explorer les applications civiles des jumeaux numériques

2.1 L'industrie manufacturière

2.1.1 Optimisation des processus de production et maintenance prédictive.

Les jumeaux numériques transforment l'industrie en reproduisant fidèlement des chaînes de production dans un espace virtuel. Ces doubles digitaux permettent de simuler des scénarios variés, d'ajuster les paramètres opérationnels et de déceler des économies, réduisant significativement les coûts. En modélisant une ligne d'assemblage en numérique, les ingénieurs testent des configurations innovantes sans perturber la production physique. Cette méthode virtuelle fait ressortir les obstacles cachés, redistribue intelligemment les ressources et fluidifie les échanges entre postes de travail. Des gains de productivité ont été observés dans divers secteurs après de tels réglages²⁹.

La maintenance prédictive exploite ces outils pour devancer les pannes en équipant les machines de capteurs qui transmettent sans relâche des données clés : chaleur dégagée, oscillations, usure des pièces. Le modèle numérique décrypte ces informations pour alerter les équipes avant la rupture, planifier des réparations ciblées et éviter les arrêts brutaux. Les industriels utilisent de plus en plus cette veille technologique pour protéger leurs équipements sensibles, limitant les coûts d'immobilisation et préservant leurs investissements.

Enfin, ces outils accélèrent le développement de produits. Les prototypes virtuels subissent des tests rigoureux : résistance mécanique, durabilité, comportement sous contraintes extrêmes. Cette transition vers le numérique réduit massivement les prototypes physiques, accélérant les cycles de développement tout en limitant le gaspillage³⁰. Dans l'automobile, des simulations complètes de lignes de production révèlent les inefficacités et ajustent les processus en amont.

2.1.2 Exemple : l'automatisation des usines intelligentes.

Les usines intelligentes (*smart factories*) incarnent l'une des applications les plus poussées des jumeaux numériques au sein de l'industrie manufacturière. Ces unités de production combinent les technologies clés vues précédemment que sont l'IoT, l'intelligence artificielle et le cloud computing pour piloter de manière autonome les chaînes de fabrication. Les jumeaux numériques y jouent un rôle central en reproduisant virtuellement l'intégralité des lignes de production. Cette copie dynamique s'alimente de données instantanées – débit des machines, niveaux de stock, consommation énergétique – pour optimiser en continu chaque maillon de la chaîne³¹.

L'automatisation fonctionne grâce à la surveillance en temps réel des équipements par les jumeaux. Ces derniers analysent les flux de production, anticipent les ralentissements et ajustent les opérations pour maintenir un rythme harmonieux. Ainsi, pour une machine surchauffant légèrement, le jumeau numérique peut ralentir son activité, répartir ses tâches sur d'autres unités ou programmer une maintenance préventive. Les capteurs embarqués transmettent des informations critiques (températures, vibrations, taux d'erreur) au modèle virtuel, qui adapte alors les paramètres ou alerte les équipes³².

La flexibilité offerte par ces outils permet aux usines de s'adapter rapidement aux évolutions du marché. Grâce aux jumeaux, un constructeur automobile peut modifier sa ligne d'assemblage pour produire un véhicule électrique après un modèle thermique, sans arrêt de production. Cette réactivité réduit les coûts liés aux changements de configuration et raccourcit les délais de commercialisation³³.

²⁹ LE JOURNAL DU NET, *op. cit.*

³⁰ TUTHILL, Todd. *SIEMENS : Remplacer les prototypes physiques par le jumeau numérique*. In : Air & Cosmos [en ligne]. Disponible sur : <https://air-cosmos.com/article/siemens-remplacer-les-prototypes-physiques-par-le-jumeau-numerique-68329>

³¹ LE JOURNAL DU NET, 15 mars 2023, *op. cit.*

³² SIEMENS, *op. cit.*

³³ INFORMATIQUE NEWS, 3 octobre 2022, *Les jumeaux numériques : un atout pour l'automatisation des usines intelligentes*. In : Informatique News [en ligne]. Disponible sur <https://www.informatiquenews.fr/les-jumeaux-numeriques-un-atout-pour-lautomatisation-des-usines-intelligentes-frank-scheufens-pny-technologies-102256>

Les jumeaux numériques contribuent aussi à une fabrication plus verte. En optimisant les cycles de production, ils réduisent le gaspillage énergétique et matériel. Une usine peut par exemple programmer ses machines pendant les heures creuses pour profiter d'électricité moins chère ou renouvelable. La maintenance prédictive, couplée à ces ajustements, diminue les pannes imprévues et prolonge la durée de vie des équipements³⁴.

Ces avancées ne relèvent plus de la science-fiction. Des usines pilotes démontrent déjà des gains tangibles : lignes de production modulaires, réduction des rebuts, énergie mieux maîtrisée. Les jumeaux numériques s'imposent comme un levier incontournable pour concilier performance industrielle et responsabilité environnementale.

2.2 Secteur de la santé

2.2.1 Modélisation de patients pour des traitements personnalisés.

Dans le domaine de la santé, les jumeaux numériques transforment la médecine en adaptant les soins à chaque patient grâce à des doubles virtuels. Ces répliques digitales rassemblent les données médicales, biologiques et physiologiques d'une personne pour imaginer des traitements taillés sur mesure³⁵.

Ces modèles combinent des sources variées : dossiers médicaux informatisés, images IRM/scanner, analyses génétiques. L'IA aide les médecins à décoder ces informations et à prévoir l'évolution des maladies. Pour un patient cardiaque, le jumeau simule les risques d'arythmie en fonction de sa tension et de ses antécédents. Cela permet un traitement ajusté avant qu'une crise ne se déclare.

Avant une opération, le jumeau évalue les risques et optimise les protocoles pour réduire les complications³⁶. On peut aussi modéliser un organe (cœur, poumon) pour anticiper des maladies ou suivre une tumeur, affiner une chimiothérapie, et programmer des consultations au moment optimal³⁷. Dassault a ainsi inventé le modèle Living Heart qui crée le jumeau numérique d'un vrai cœur grâce à des capteurs biotechniques et une technologie de *scanning*. Les propriétés électriques et musculaires obtenues reproduisent le comportement du vrai cœur³⁸.

Dans le diabète ou l'insuffisance cardiaque, des capteurs connectés portables (montres, patches) envoient en temps réel des données (glycémie, rythme cardiaque) au jumeau. Ce dernier alerte les soignants en cas de valeurs anormales, permettant une intervention rapide. Un diabétique verrait son traitement ajusté automatiquement selon son activité physique ou son dernier repas, via une boucle entre capteurs de glycémie et pompe à insuline connectée.

Le projet Digitwins rassemble la collaboration de 118 entreprises et institutions académiques à l'échelle mondiale. Son ambition est de créer un jumeau numérique pour chaque citoyen européen, afin d'aider les médecins à affiner les diagnostics et à choisir des traitements adaptés. Le défi financier est monumental : en Europe, les dépenses liées à des traitements inadéquats atteindraient 280 milliards d'euros par an. Un investissement dans ces jumeaux pourrait réduire ce gaspillage en optimisant les parcours de soins³⁹.

Si cette technologie promet des avancées majeures, elle soulève des questions : confidentialité des données, biais algorithmiques, accès inégal aux soins high-tech. Une charte éthique encadrant son usage reste à définir. Dans les armées, des jumeaux numériques humains sont envisagés et seront abordés plus tard dans le document. Les questions de confidentialité des données prennent alors une dimension encore plus capitale.

³⁴ SCHNEIDER ELECTRIC, 2 février 2023, *Smart factories and digital twins: Accelerating industrial transformation*. In : Schneider Electric Blog [en ligne]. Disponible sur <https://blog.se.com>

³⁵ SIEMENS HEALTHINEERS, [sans date], *Digital Twins in Healthcare*. In : Siemens Healthineers [en ligne]. Disponible sur <https://www.siemens-healthineers.com/digital-health-solutions/digital-twin>

³⁶ LE JOURNAL DU NET, *op. cit.*

³⁷ CNRS, 6 juillet 2024, *L'essor des jumeaux numériques face à leurs défis*. In : CNRS Actualités [en ligne]. Disponible sur <https://www.cnrs.fr/fr/actualite/lessor-des-jumeaux-numeriques-face-leurs-defis>

³⁸ JULIEN Nathalie, MARTIN Eric, *op. cit.*, p 30.

³⁹ Id.

2.2.2 *Exemple : DeepLife et l'innovation thérapeutique.*

Lancée en 2019 par Jonathan Baptista et Jean-Baptiste Morlot, la start-up DeepLife bouleverse la recherche pharmaceutique avec sa plateforme SaaS. Celle-ci marie données biologiques complexes et intelligence artificielle générative pour créer des répliques numériques de cellules, une percée majeure pour accélérer la découverte de médicaments. DeepLife mise sur des réseaux de neurones profonds et des cartes cellulaires d'une extrême précision. Ces outils révolutionnaires reproduisent des molécules biologiques en un clin d'œil, repèrent des signaux imperceptibles et ajustent les échanges entre cellules. Concevoir une nouvelle molécule prend désormais quelques mois, contre des années auparavant.

En 2024, le partenariat avec l'INSERM⁴⁰ a marqué un tournant : DeepLife s'attaque à des maladies jugées invincibles, comme certaines scléroses en plaques ou troubles neurologiques complexes. La même année, la start-up a décroché 10 millions d'euros pour perfectionner sa technologie et dynamiser les codes des biotechs⁴¹.

2.3 *Transports et logistique*

2.3.1 *Gestion optimisée des flottes et des infrastructures.*

Les jumeaux numériques révolutionnent la logistique et le transport en proposant une gestion ultra-précise des flottes. Les doubles virtuels des camions, routes et entrepôts permettent de suivre en direct l'état des véhicules, d'éviter les embouteillages en ajustant les trajets, et de réduire les temps d'arrêt inutiles⁴². Un logisticien peut ainsi recalculer ses tournées en fonction du trafic, comme un GPS dopé à l'IA, pour gagner du temps et du carburant. Grâce aux capteurs fixés sur les camions, le jumeau fait de la maintenance prédictive et détecte un moteur qui chauffe trop ou des pneus trop usés avant que la panne ne survienne. Moins de véhicules restent immobilisés en urgence. En milieu urbain, ces outils modélisent les flux de circulation, repèrent les heures de pointe et indiquent où garer les camions pour échapper aux bouchons⁴³. Un livreur évite un quartier congestionné grâce à une alerte du jumeau, livrant ses colis à l'heure sans stress. Côté écologie, les jumeaux suggèrent aussi des itinéraires moins polluants et aident à réduire la consommation de gasoil⁴⁴. Au final, les entreprises économisent, gagnent en efficacité, et limitent leur empreinte carbone⁴⁵. Cette utilisation est facilement transposable aux opérations logistiques des armées pour optimiser les flux.

2.3.2 *Exemple : Les avionneurs et le jumeau numérique.*

Les avionneurs ont fait des jumeaux numériques un outil clé pour réinventer la conception, la fabrication et l'entretien des avions. Cette technologie s'impose désormais comme un pilier de l'innovation aéronautique, combinant précision technique et gains opérationnels.

Airbus a franchi un cap en 2015 avec l'A350, premier appareil équipé d'une maquette numérique complète dès sa sortie d'usine. Aujourd'hui, le constructeur applique cette technologie à ses chaînes de production. Alain Tropis, responsable du programme DDMS (Digital Design, Manufacturing &

⁴⁰ Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

⁴¹ FRENCHWEB.FR, 16 décembre 2024, Jumeaux numériques : La startup DEEPLIFE lève 10 millions d'euros pour faire entrer la biotech dans une nouvelle ère d'innovation thérapeutique. In : FrenchWeb.fr [en ligne]. Disponible sur <https://www.frenchweb.fr/jumeaux-numeriques-la-startup-deeplife-leve-10-millions-deuros-pour-faire-entrer-la-biotech-dans-une-nouvelle-ere-d-innovation-therapeutique>

⁴² SHIP TNL, 7 novembre 2024. Digital Twins in Fleet Management: Real-Time Optimization Tools. In : Ship TNL [en ligne]. Disponible sur : <https://www.shiptnl.com/post/digital-twins-in-fleet-management-real-time-optimization-tools>

⁴³ F-INITIATIVES, 29 octobre 2024. Industrie 4.0 : Déverrouiller le potentiel des jumeaux numériques. In : F-initiatives [en ligne]. Disponible sur : <https://www.f-initiatives.com/actualites/rd/industrie-4-0-deverrouiller-le-potentiel-des-jumeaux-numeriques/>

⁴⁴ MERITIS, 2 octobre 2024. Blockchain et jumeaux numériques : clés du développement durable. In : Meritis [en ligne]. Disponible sur : <https://meritis.fr/blog/blockchain-et-jumeaux-numeriques-une-revolution-pour-le-developpement-durable>

⁴⁵ THE SCX CHANGE, 27 août 2024. How digital twins can transform trucking operations. In : The SCX Change [en ligne]. Disponible sur : <https://www.thescxchange.com/articles/10784-how-digital-twins-can-transform-trucking-operations>

Services) d'Airbus, confirme le déploiement prochain d'un jumeau dédié aux processus industriels. À Hambourg, cet outil simule les interactions entre machines et pièces lors du pré-assemblage de l'A321, limitant les erreurs et accélérant les délais. Sur l'A350 XWB, Airbus utilise les jumeaux pour réduire la consommation de carburant. Les données en direct permettent d'ajuster les paramètres de vol et les cycles de maintenance, optimisant chaque vol.

Boeing, précurseur dès 1995 avec le Boeing 777, a vu la qualité de ses pièces s'améliorer de 40 % grâce aux jumeaux, selon Dennis Muilenburg, son ex-PDG. Un bond en efficacité qui reste une référence dans le secteur.

Les avionneurs tirent de nombreux bénéfices de l'utilisation de jumeaux numériques. Au niveau de la conception, cela vient réduire les coûts et les délais de développement grâce à des simulations ultra-réalistes. La sécurité se trouve également renforcée par des tests virtuels poussés pour identifier les faiblesses structurelles avant la production. L'espace numérique partagé entre ingénieurs et sous-traitants permet en outre de fluidifier les échanges⁴⁶.

D'ici 2030, les jumeaux permettront des avions plus légers et moins polluants, tout en simplifiant leur entretien. La filière mise aussi sur ces outils pour accélérer la transition vers l'hydrogène et les carburants durables. Les jumeaux numériques ne sont plus une option, mais une nécessité pour les avionneurs. Entre gains de performance, maîtrise des coûts et exigences écologiques, ils redessinent les règles de l'aéronautique moderne.

2.4 Énergie, urbanisme et infrastructures critiques

Dans un contexte de transition écologique accélérée, les jumeaux numériques émergent comme des leviers pour moderniser les réseaux énergétiques, repenser l'aménagement du territoire et sécuriser les infrastructures critiques.

2.4.1 Optimisation des réseaux énergétiques

Les opérateurs du secteur énergétique déploient ces technologies afin de perfectionner les protocoles de maintenance tout en anticipant les défaillances critiques. RTE (Réseau de Transport d'Électricité) a conçu une réplique dynamique de son réseau haute tension, intégrant un flux continu de données IoT (mesures de tension, paramètres thermiques)⁴⁷. Ce dispositif autorise une évaluation fine des impacts liés au déploiement intensif d'énergies renouvelables intermittentes (parcs éoliens, centrales photovoltaïques), tout en régulant les transferts énergétiques selon une logique adaptative. Les jumeaux numériques trouvent donc des applications dans l'optimisation du mix énergétique mais également dans l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments⁴⁸.

Chez GRTgaz, des solutions de jumeaux numériques sont développées à des fins de maintenance prévisionnelle⁴⁹. Enedis utilise des jumeaux dans le cadre de ses activités de recherche et développement, notamment pour optimiser la gestion du réseau électrique. L'entreprise a identifié les moments de congestion du réseau grâce à un jumeau numérique, ce qui permet d'ajuster l'offre et la demande d'électricité afin d'éviter la surcharge du réseau⁵⁰. Dans les armées, à l'heure où les technologies modernes demandent de plus en plus d'énergie, ces pistes d'optimisation ouvrent une voie prometteuse.

⁴⁶ THE LOCATION LAB PVT LTD, Date non spécifiée. Digital Twins in Aerospace Industry. In : LinkedIn [en ligne]. Disponible sur : <https://www.linkedin.com/pulse/digital-twins-aerospace-industry-the-location-lab-pvt-ltd->

⁴⁷ RTE, 7 juin 2024, *Bilan R&D 2023*. In : RTE Publications [en ligne]. Disponible sur : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2024-06/2024-06-07-bilan-rd-2023.pdf>, 162 p., p.21

⁴⁸ BENMILOUD, L. et BECHET, L., mai 2024. Digital Twin in the Energy Sector. In : Assystem [en ligne]. Disponible sur : <https://www.assystem.com/wp-content/uploads/2024/05/SOTA-REPORT-Benmiloud-Bechet-Lies-Digital-Twin-in-the-Energy-Sector.pdf>

⁴⁹ GRTgaz, décembre 2023, *Rapport d'activités RDI 2022*. In : GRTgaz [en ligne]. Disponible sur : <https://www.grtgaz.com/sites/default/files/ra/rapport-activite-rice-2023.pdf>

⁵⁰ ENEDIS, mars 2024, *Plan de développement des Smart Grids*. In : ENEDIS [en ligne]. Disponible sur : <https://www.enedis.fr/sites/default/files/documents/pdf/programme-de-rd-et-d-innovation-d-enedis.pdf>, 24 p., p.14

2.4.2 *Urbanisme et villes intelligentes*

Dans le domaine urbain, les jumeaux numériques constituent des instruments clés pour concevoir des cités durables. Singapour se positionne en pionnier avec Virtual Singapore, une réplique digitale interactive qui cartographie en 3D les dynamiques urbaines : flux piétons, variations démographiques et réseaux de transport. Développé sur la plateforme 3DEXPERIENCE de Dassault Systèmes, cet outil transforme la donnée brute en leviers d'action concrets pour les décideurs publics⁵¹. En France, Rennes Métropole exploite son propre jumeau numérique - fruit d'une collaboration similaire - pour anticiper les crises, modéliser les déplacements urbains et optimiser les dépenses énergétiques⁵². L'objectif pour la communauté est de déterminer le positionnement du « bon jumeau numérique » en termes d'applications et de portée géographique en fonction de ses besoins (cohérence entre le jumeau numérique et le territoire)⁵³. Le jumeau numérique constitue une solution, une réponse à un besoin, mais il n'est pas un but « en soi ». L'identification des besoins et des objectifs dévolus à ce jumeau est donc essentielle.

2.4.3 *Infrastructures critiques*

Les répliques virtuelles contribuent à sécuriser les installations sensibles (barrages, plates-formes aéroportuaires, réseaux ferrés). EDF mise sur les jumeaux numériques pour accompagner la construction et l'exploitation de ses réacteurs nucléaires EPR2. Le jumeau numérique d'EPR2, opérationnel depuis l'été 2022, intègre 16 millions de données et va suivre la centrale tout au long de son cycle de vie, de la conception au démantèlement⁵⁴. Ces applications pourraient se transposer au nucléaire militaire afin d'optimiser les lourds cycles de maintenance et anticiper les avaries.

Les jumeaux numériques permettent aux aéroports de se transformer en organisations "basées sur les données", facilitant une prise de décision adaptée pour assurer une exploitation efficace et un développement opportun des installations. Grâce aux jumeaux numériques, les ingénieurs chargés de la maintenance peuvent surveiller à distance la détérioration du revêtement des pistes et mieux cibler les zones nécessitant des travaux de resurfacement. L'aéroport de Sydney a développé Maps@SYD⁵⁵, un jumeau numérique qui fournit à plus de 200 utilisateurs une image complète du campus de l'aéroport, permettant d'économiser 65 heures de travail par semaine à l'équipe chargée de l'aménagement de l'espace. Là encore, une transposition aux bases aériennes militaires permettrait un gain d'efficacité.

2.5 *Quels enseignements tirer des avancées civiles pour les armées ?*

2.5.1 *Adapter les innovations industrielles aux besoins militaires*

Les avancées civiles en matière de jumeaux numériques ouvrent des horizons fascinants pour nos forces armées. Transposer ces innovations du monde industriel au domaine militaire exige cependant une approche réfléchie. Ainsi, dans l'industrie manufacturière, les jumeaux numériques pourraient révolutionner la maintenance prédictive des équipements militaires. Un char de combat pourrait bénéficier d'une surveillance de ces installations critiques en temps réel, permettant d'anticiper la moindre défaillance avant qu'elle ne survienne sur le terrain.

⁵¹ Mostathmr, 16 novembre 2023, *Le projet Virtual Singapore cartographie une ville entière en 3D*, In : Mostathmr [en ligne]. Disponible sur : <https://mostathmr.com/fr/themes/69868-the-virtual-singapore-project-is-mapping-out-an-entire-city>

⁵² CEREMA, date non communiquée, Espace Numérique responsable Rennes Métropole. In : CEREMA [en ligne]. Disponible sur : <https://smart-city.cerema.fr/numerique-responsable/rennes-metropole>

⁵³ Banque des Territoires, juillet 2021, *Benchmark des jumeaux urbains*. In : Banque des Territoires [en ligne]. Disponible sur : https://www.banquedesterritoires.fr/sites/default/files/2021-07/benchmark_BDT_Juillet.pdf (p.47)

⁵⁴ SILICON.FR, 2 février 2023. Comment EDF mise sur les jumeaux numériques pour construire ses futurs EPR. In : Silicon.fr [en ligne]. Disponible sur : <https://www.silicon.fr/Thematique/actualites-1367/Breves/Comment-EDF-mise-sur-les-jumeaux-numeriques-pour-construire-ses-402429.htm>

⁵⁵ COCKERELL, Steve, 2025. Réinventer les aéroports de demain grâce aux jumeaux numériques. In : HexaBIM [en ligne]. Disponible sur : <https://www.hexabim.com/publications/reinventer-les-aeroports-de-demain-grace-aux-jumeaux-numeriques>

Du côté de la formation, les environnements virtuels issus du civil pourraient métamorphoser l'entraînement de nos soldats. Des simulations leur offriraient la possibilité de s'exercer dans des conditions quasi-réelles, tout en réduisant drastiquement les coûts et les risques inhérents aux exercices grandeur nature. L'armée de Terre française explore d'ailleurs déjà les potentialités de la réalité étendue pour la planification et la formation, s'inspirant des percées civiles en matière de visualisation 3D et d'interaction homme-machine⁵⁶.

Les jumeaux numériques urbains, quant à eux, pourraient être adaptés pour affiner la planification et la conduite des opérations militaires. Une modélisation fine des théâtres d'opérations, intégrant données géospatiales, météorologiques et de renseignement, affûterait considérablement la prise de décision tactique et stratégique. Dans le domaine crucial de la cybersécurité, les techniques civiles de simulation d'attaques pourraient être transposées pour muscler la résilience de nos réseaux militaires.

Cependant, l'intégration de ces technologies dans le giron militaire soulève des défis spécifiques. L'interopérabilité entre les différents systèmes et standards militaires reste un casse-tête, sans parler de la gestion et de la protection des données sensibles. De plus, adapter nos structures organisationnelles et former notre personnel à ces nouvelles technologies représente un chantier colossal. En somme, si l'adaptation des innovations civiles en matière de jumeaux numériques promet une modernisation et une efficacité opérationnelle accrues pour nos forces armées, cette transition exige une approche équilibrée, prenant en compte les particularités du monde militaire et les écueils liés à l'intégration de ces technologies de pointe.

2.5.2 *Identifier les limites et ajuster les solutions civiles au contexte militaire*

L'adaptation des jumeaux numériques civils aux impératifs militaires se heurte à des écueils structurels révélés par plusieurs études récentes. L'interopérabilité entre systèmes hétérogènes constitue un défi majeur : les différences de standards OTAN et les contraintes de sécurité multi-niveaux complexifient l'intégration des données entre, par exemple, drones, satellites et systèmes terrestres⁵⁷.

La protection des données sensibles émerge comme une limite critique. Le Red Alert Labs, un laboratoire international de cybersécurité et un organisme d'évaluation de la conformité spécialisé dans l'Internet des Objets, met en garde contre les risques de fuites via les capteurs IoT civils réutilisés⁵⁸. Ces faiblesses sont exacerbées par la gestion fragmentée des droits de propriété intellectuelle, particulièrement problématique dans les consortiums industriels⁵⁹. Ainsi, les jumeaux numériques contiennent des informations et de la propriété intellectuelle précieuses, généralement détenues par le fabricant d'équipement d'origine. Or, ces fabricants sont généralement plus susceptibles de partager des données avec les clients, mais moins susceptibles de les partager avec d'autres industriels, en particulier s'ils sont concurrents. Cela crée une barrière au partage d'informations et augmente la probabilité d'utiliser des formats d'information propriétaires ou spécifiques, rendant le partage plus difficile.

L'initiative Model One de l'US Air Force illustre les défis d'intégration des jumeaux numériques militaires. Ce projet vise à unifier 50 simulations militaires distinctes, soulignant la complexité de l'interopérabilité dans le domaine de la défense⁶⁰. Si le remplacement des tests physiques par des

⁵⁶ Ministère des Armées, 2024. La réalité étendue et les jumeaux numériques : quelles implications pour les forces terrestres ?. In : Terre [en ligne]. Disponible sur : <https://www.terre.defense.gouv.fr/ccf/nos-publications/recherche-conflits/notes-recherche-sciences-technologies/realite-etendue-jumeaux-numeriques>

⁵⁷ SKINNER, Simon G., 2024. *Taking Simulation Interoperability Standards to the Next Level with Digital Twins*. In : NATO STO Publications [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-MSG-197/MP-MSG-197-25.pdf>.

⁵⁸ RED ALERT LABS, 2025. Security Concerns for Military IoT Devices. In : Red Alert Labs [en ligne]. Disponible sur : <https://www.redalertlabs.com/blog/security-concerns-for-military-iot-devices>

⁵⁹ SKINNER, Simon G., et PENA REGUEIRO, Iván, 2024. *Working on the Problem of Digital Twin Interoperability*. In : NATO STO [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-AVT-369/MP-AVT-369-29.pdf>

⁶⁰ MOSIMTEC, 2023. Model One: Revolutionizing Digital Twins in Military and Industry. In: MOSIMTEC [en ligne]. Disponible sur : <https://mosimtec.com/model-one-revolutionizing-digital-twins-in-military-and-industry/>

simulations virtuelles accélère l'innovation, il interroge la fiabilité et l'exactitude requises dans des contextes militaires aux enjeux vitaux. Reproduire la complexité des systèmes militaires dans un modèle unique exige souvent des milliers de sous-modèles interconnectés, une réalité technique exigeante.

Un rapport britannique⁶¹ souligne le défi posé par la diversité des fournisseurs impliqués dans les sous-systèmes militaires, plaidant pour une approche fédérée des jumeaux numériques. Développer des architectures ouvertes et des normes communes devient alors impératif pour faciliter l'échange de données entre jumeaux, qu'ils opèrent à l'échelle d'un composant, d'un système ou d'une flotte entière. Cette interopérabilité technique est un prérequis pour obtenir une vision unifiée des opérations, indispensable en milieu militaire.

L'intégration de l'intelligence artificielle et du *machine learning* nécessite une vigilance accrue : la validation rigoureuse des modèles et des protocoles de test stricts sont essentiels pour garantir la fiabilité des décisions fondées sur ces technologies. La confiance dans les résultats demeure un pilier incontournable. En parallèle, la transition vers les jumeaux numériques exige une adaptation organisationnelle profonde : formations spécialisées, refonte des processus et gestion du changement structurel. La création de communautés d'intérêt au sein des forces armées facilite le partage d'expériences et de bonnes pratiques, aidant ainsi à surmonter les défis liés à l'adoption de ces technologies.

Si les applications civiles des jumeaux numériques démontrent leur potentiel transformateur, leur transposition au domaine militaire exige une réévaluation en regard des contraintes opérationnelles. Les innovations sectorielles (maintenance prédictive aéronautique, réseaux énergétiques décarbonés) fournissent un socle technologique exploitable que les armées doivent adapter à leurs spécificités et exigences.

⁶¹ TEAM DEFENCE INFORMATION, 2021. Defence Digital Twin Implementation Road Map and Development Framework. In: Team Defence Information [en ligne]. Disponible sur : <https://www.teamdefence.info/wp-content/uploads/2022/03/20210121-Digital-Twin-Implementation-Road-Map-and-Development-Framework-White-Paper-V1.pdf>

3 Adapter les jumeaux numériques aux forces armées

3.1 Entraînement et simulation

L'essor des jumeaux numériques marque un tournant stratégique dans les méthodes de préparation opérationnelle des forces armées, particulièrement pour les unités terrestres⁶². Ces doubles virtuels dynamiques de systèmes physiques gommant les contraintes matérielles tout en renouvelant les approches pédagogiques. En complément des exercices conventionnels - générateurs de risques et de coûts logistiques - ces technologies offrent une immersion tactique dans des configurations paramétrables ajustées aux impératifs militaires.

L'armée de Terre intègre progressivement des solutions de réalité hybride au sein de son dispositif de formation. Le programme SCORPION incarne cette mutation technologique à travers son système SEMBA (Simulation Embarquée) et ses plateformes CERBERE (Centres d'Entraînement en Réalité Battue Enrichie). Ces interfaces innovantes combinent l'utilisation d'équipements réels avec des projections numériques, comme en témoignent les optiques de vision des blindés enrichies de surcouches augmentées. Des infrastructures telles que le CENZUB (Centre d'Entraînement aux Actions en Zone Urbaine) connaissent une digitalisation accélérée visant à objectiver l'évaluation des compétences individuelles. Les jumeaux numériques étendent cette logique grâce aux TOHP (Théâtres d'Opérations Hybrides Partagés), répliques virtuelles reconstituées à partir de données collectées par des drones qui permettent aux états-majors de simuler des schémas opérationnels complexes dans des environnements contrôlés.

La modularité pédagogique constitue un avantage indéniable de ces technologies émergentes⁶³. Chaque soldat évolue dans un environnement calibré selon son profil opérationnel, ses besoins identifiés et ses objectifs de progression. L'intelligence artificielle contribue à cette personnalisation par le traitement analytique des données de performance, permettant d'ajuster de manière dynamique les scénarios d'entraînement. Les échelons de commandement exploitent parallèlement ces outils dans des centres de planification numérique où les chefs étudient des modélisations tridimensionnelles conformes aux théâtres d'opérations réels⁶⁴. Cette immersion anticipée facilite le repérage des points critiques et l'ajustement des tactiques en amont des engagements sur le terrain.

La capacité à reproduire à l'infini des scénarios complexes représente un autre atout stratégique de ces technologies⁶⁵. Les militaires peuvent s'exercer à des séquences à haute intensité - incluant celles présentant un danger physique élevé - sans exposition aux aléas du réel. Selon le *Centre for Joint Warfare Studies* (CENJOWS), think tank créé à l'initiative du ministère de la défense indien, ces jumeaux autorisent également l'exploration méthodique de variables tactiques telles que les changements météorologiques imprévisibles ou les réactions adverses non anticipées⁶⁶. L'évaluation quantitative des décisions, couplée aux retours d'expérience et aux modèles prédictifs, permet d'affiner progressivement les réflexes opérationnels et les prises de décision sous pression. Les doubles virtuels apparaissent également déterminants pour acclimater les troupes aux nouveaux matériels militaires développés grâce à ces mêmes technologies, instaurant une synergie entre conception industrielle et formation opérationnelle.

Sur le plan logistique, ces solutions atténuent significativement les contraintes budgétaires et environnementales. La mutualisation des ressources virtuelles via des systèmes comme XERENA, un outil développé par une filiale de Rheinmetall, réduit les coûts liés au déploiement de matériel lourd ou

⁶² NASLIN, Maëlys, 17 mars 2022. La réalité étendue et les jumeaux numériques : quelles implications pour l'entraînement et la planification au sein de l'armée de Terre ? In : Ministère des Armées, Armée de Terre [en ligne]. Disponible sur : <https://www.terre.defense.gouv.fr/ccf/nos-publications/recherche-conflits/notes-recherche-sciences-technologies/realite-etendue-jumeaux-numeriques>

⁶³ RHEINMETALL, 27 avril 2023. E-Learning – Army: With digital training to mission readiness. In : Rheinmetall [en ligne]. Disponible sur : <https://www.rheinmetall.com/en/products/simulation-training/simulation-and-training/military-training-solutions/army/e-learning-army>

⁶⁴ NASLIN, *op. cit.*

⁶⁵ RHEINMETALL, *op. cit.*

⁶⁶ CENJOWS, *op. cit.*

à l'accès à des terrains spécialisés⁶⁷. Les données techniques, modules pédagogiques et supports de formation deviennent accessibles en temps réel, y compris sur les zones de déploiement opérationnel éloignées. Cela faciliterait également la tenue d'un exercice conjoint entre des unités physiques, potentiellement éloignées géographiquement et des unités virtuelles. Ainsi, un exercice pourrait associer des frégates réelles contre un équipage de sous-marin s'entraînant sur simulateur. Cette accessibilité permanente offerte par ces systèmes favorise une mise à jour continue des savoir-faire opérationnels, éliminant la nécessité de déploiements coûteux ou de mobilisation disproportionnée de moyens logistiques.

Cependant, ces innovations technologiques ne peuvent se substituer à l'expérience tangible du terrain. La manipulation concrète des équipements, la gestion physiologique du stress en environnement hostile et l'adaptation tactique aux imprévus restent indissociables d'un entraînement physique en conditions réelles. L'objectif stratégique actuel consiste à harmoniser l'interaction entre les apprentissages virtuels et les exercices pratiques, tout en assurant l'adoption de ces outils par l'ensemble des échelons décisionnels.

Une autre application passe par l'utilisation de jumeaux numériques humains (HDT : *Human Digital Twins*). Chaque militaire aurait son propre HDT personnalisé⁶⁸. Lors de son incorporation, un scanner corporel serait réalisé, ainsi que d'autres examens médicaux de base et des évaluations de la condition physique, afin de créer le HDT. Le HDT fonctionne alors comme un dossier médical augmenté qui suit le militaire tout au long de sa carrière et qui est continuellement mis à jour à partir de diverses sources de données. Des chercheurs étudient l'apport du suivi des variations quotidiennes de la physiologie à l'aide de données de capteurs pour prévenir par exemple le risque de blessure et suivre la préparation opérationnelle d'un combattant. Cela pose naturellement des questions éthiques.

Les répercussions stratégiques de ces transformations technologiques redessinent les principes fondamentaux de la préparation militaire moderne. L'association inédite de réalisme simulé, de personnalisation pédagogique et de rationalisation des ressources donnerait un rôle central aux jumeaux numériques dans la modernisation des forces armées. Leur principal atout consiste à compléter - sans jamais supplanter - les méthodes traditionnelles, créant ainsi une symbiose entre progrès technologique et préservation des savoir-faire éprouvés. Le défi à venir résidera dans le maintien de cet équilibre précaire tout en intensifiant l'adoption de ces dispositifs au sein des structures militaires historiques.

3.2 Maintenance prédictive des équipements

La maintenance prédictive, soutenue par les jumeaux numériques, s'impose comme un pivot transformationnel pour les armées, surpassant les méthodes conventionnelles grâce à son aptitude à prévenir les dysfonctionnements et maximiser la disponibilité opérationnelle des équipements. Dépasant le cadre des interventions correctives ponctuelles, cette approche repose sur une supervision permanente couplée à une exploitation intensive des données, inaugurant une gestion anticipée du cycle de vie des systèmes militaires.

L'essor de cette maintenance nouvelle génération dépend fondamentalement de l'acquisition de données fiables. Les matériels militaires - véhicules blindés comme systèmes d'armement complexes - intègrent désormais des réseaux de capteurs avancés surveillant en continu des indicateurs clés. Ces flux informationnels alimenteraient des répliques virtuelles, fournissant une image précise de l'intégrité des systèmes et permettant le repérage précoce d'anomalies. L'adoption de l'informatique décentralisée (edge computing), traitant les données directement sur le terrain, renforce la sécurité opérationnelle en réduisant la vulnérabilité aux infrastructures cloud distantes.

Des applications concrètes témoignent de cette mutation technologique. Le projet NumCo, développé conjointement par KNDS France et Arquus, crée un double virtuel du Véhicule Blindé de Combat

⁶⁷ RHEINMETALL, *op. cit.*

⁶⁸ NATO STO, 2025. Technologies for Developing Warfighter Digital Twins with Biomechanics and Physiology. In : NATO Science and Technology Organization [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-HFM-MSG-375/MP-HFM-MSG-375-07.pdf>

d'Infanterie (VBCI)⁶⁹. Ce dispositif permet un suivi temps réel de l'état mécanique, une anticipation des pannes et une rationalisation des opérations de maintenance. Les capteurs HUMS (Health and Usage Monitoring System) génèrent des données exploitées par des modèles prédictifs estimant la durée de vie résiduelle des composants en fonction des conditions d'emploi.

Dans le domaine aéronautique, le contrat RAVEL (maintenance RAfale VERTicaLisée) de Dassault applique cette logique à la flotte de Rafale. Chaque appareil (hors moteurs et sièges éjectables) dispose d'une réplique numérique sur la plateforme 3DExperience, analysant les données techniques pour optimiser les procédures de maintenance et émettre des alertes préventives⁷⁰. Cette approche se traduit par une disponibilité accrue des avions.

Au niveau maritime, Siemens fournit à l'*US Navy* des jumeaux numériques de chantiers navals qui reflètent l'état virtuel de toutes les installations, équipements, personnel, processus de maintenance et de soutien logistique associés⁷¹. Ils permettent notamment à la marine de tester les changements dans un environnement virtuel fermé sans perturber le travail actuel ou impacter les missions.

L'utilisation des jumeaux numériques est également envisagée pour les satellites, notamment dans l'anticipation et le diagnostic des pannes, la gestion et le positionnement ou encore les agressions contre ces derniers⁷². Cela garantira une couverture continue des satellites au-dessus des zones de conflit tout en assurant leur protection.

Les bénéfices de cette révolution de la maintenance sont pluridimensionnels. Réduction drastique des immobilisations techniques, optimisation des calendriers d'intervention et rationalisation des stocks de pièces détachées en constituent les principaux axes⁷³. Ces gains opérationnels s'accompagnent d'une réduction des coûts de maintenance, tout en prolongeant la durée de vie utile des équipements - avantage stratégique dans un contexte de restrictions budgétaires chroniques.

Néanmoins, cette mutation technologique soulève des défis spécifiques au milieu militaire. La sécurisation des flux de données sensibles exige des architectures cyber-résilientes, particulièrement face aux menaces de sabotage informationnel. L'hétérogénéité des systèmes et la multiplicité des standards techniques compliquent l'interopérabilité, nécessitant le développement de protocoles communs⁷⁴. La transition organisationnelle implique par ailleurs une reconversion des compétences techniques et une refonte des processus décisionnels historiques.

En définitive, l'intégration des jumeaux numériques dans les stratégies de maintenance marque un saut capacitaire majeur pour les armées. Cette évolution permet une gestion à la fois plus efficace et économiquement viable des parcs matériels, transformant les logiques réactives en démarches anticipatrices aux bénéfices tactiques et financiers tangibles.

⁶⁹ OPEX360, 12 février 2024. Nexter et Arquus vont développer un « jumeau numérique » du Véhicule Blindé de Combat d'Infanterie. In : OPEX360 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.opex360.com/2024/02/12/nexter-et-arquus-vont-developper-un-jumeau-numerique-du-vehicule-blinde-de-combat-dinfanterie/>

⁷⁰ JAMES, Olivier, 24 avril 2020. Les avionneurs s'emparent du jumeau numérique. In : L'Usine Nouvelle [en ligne]. Disponible sur : <https://www.usinenouvelle.com/editorial/les-avionneurs-s-emparent-du-jumeau-numerique.N953846>

⁷¹ SIEMENS GOVERNMENT TECHNOLOGIES, date non mentionnée. Digitalization for Defense. In: Siemens Government Technologies [en ligne]. Disponible sur: <https://www.siemensgovt.com/solutions/digitalization-for-defense>

⁷² CENJOWS, *op. cit.*

⁷³ TULI, Munish, 2023. AI and the Potential to Create Digital Twins to Transform Military Logistics. In : CLAWS Journal [en ligne]. Disponible sur : https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/97181/ssoar-claws-2023-2-tuli-AI_and_the_Potential_to.pdf?sequence=1&isAllowed=y

⁷⁴ PERFORMANCE DEFENSE, 13 février 2025. Data-Driven Defense: Predictive Maintenance for Military Aircraft. In : Performance Defense [en ligne]. Disponible sur : <https://performancedefense.com/data-driven-defense-predictive-maintenance-increasing-mission-readiness/>

3.3 Planification et conduite des opérations

L'intégration des jumeaux virtuels dans les processus militaires marque un tournant décisif dans la planification et la conduite des opérations⁷⁵. Ces dispositifs numériques offrent aux états-majors des capacités analytiques et décisionnelles inédites, permettant une optimisation des ressources. La modélisation précise de théâtres d'opérations complexes, couplée à la réplique virtuelle des systèmes d'armement et des chaînes logistiques, crée un environnement expérimental sécurisé pour tester de multiples scénarios. Cette capacité de simulation autorise une évaluation comparative des options stratégiques, une anticipation des risques et une allocation raisonnée des moyens humains et matériels avant tout engagement sur le terrain.

Dans le contexte d'une recherche en ingénierie des modèles, un jumeau numérique a été appliqué à un drone pour confirmer la procédure de choix de la trajectoire⁷⁶. Le drone a acquis des informations concernant la présence de l'ennemi grâce à ses capteurs intégrés. Ces informations sont traitées par le jumeau numérique, qui, en tenant compte des paramètres de la mission (objectif, charge utile, vitesse, autonomie, prise de risque), optimise l'itinéraire et recommande de choisir l'itinéraire B pour éviter l'ennemi, comme illustré ci-dessous.



Figure 4 : Itinéraire proposé par un jumeau numérique de drone⁷⁷

Chez Dassault, un projet de jumeau numérique permet de décrire toute la manœuvre logistique d'une opération militaire⁷⁸ : maintenance des aéronefs, ravitaillement en carburant et en munitions, nombre de mécaniciens nécessaires, etc. Ainsi, couplé à un outil de planification utilisant des méthodes statistiques (type Monte Carlo), le meilleur compromis est recherché pour optimiser le potentiel d'emploi des aéronefs. La meilleure répartition des aéronefs entre les différentes bases à terre possibles est proposée en fonction des zones de patrouille à couvrir. Cette approche permet de simuler plusieurs milliers de scénarios en quelques heures, identifiant les combinaisons les plus efficaces.

L'utilisation des jumeaux numériques dans la guerre électronique (GE) constitue également un cas d'usage intéressant. Face à l'expansion de l'empreinte numérique, la GE constitue une préoccupation majeure pour les forces militaires. Les jumeaux offrent la possibilité de confirmer les éléments concernant l'évaluation de la menace, la mise à jour de la bibliothèque, les actions offensives et les

⁷⁵ RESTACKIO, 18 février 2025. Digital Twins In Military Tech. In : Restackio [en ligne]. Disponible sur : <https://www.restack.io/p/digital-twins-in-ai-answer-military-tech-apps-cat-ai>

⁷⁶ CENJOWS, *op. cit.*

⁷⁷ LEE, Eugene Boon Kien, VAN BOSSUYT, Douglas L. et BICKFORD, Jason F., 14 novembre 2021. L'aide à la décision numérique à double intention dans le domaine de l'ingénierie et de la planification des routes des missions. In : Systèmes [en ligne]. Vol. 9, n° 4, article 82. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/systems9040082>

⁷⁸ DASSAULT, échange lors d'une visite le 26 février 2025. Ce projet n'est pas encore déployé dans les armées.

solutions d'évasion avec plus de rapidité⁷⁹. De plus, il est possible de configurer et de situer de manière probabiliste les portées des émetteurs opposants. L'emploi de capteurs intégrés et de jumeaux permet d'accélérer le cycle de GE. Alors que la distinction entre ami et ennemi reste toujours difficile, les jumeaux offrent une aide précieuse pour établir la cartographie électromagnétique et devenir une aide cruciale à la décision.

Une valeur ajoutée forte de ces technologies réside dans leur aptitude à fusionner des flux informationnels hétérogènes en temps réel. Données terrains issues de capteurs IoT, renseignements stratégiques et paramètres techniques des systèmes d'armes convergent vers une représentation dynamique unique. Cette synthèse cognitive augmente fortement la vision de la situation des décideurs, leur offrant une vision globale et actualisée en continu du champ opérationnel⁸⁰. Cela permet des arbitrages éclairés et des réactions adaptées face aux aléas.

Les jumeaux numériques améliorent la coordination interarmées en permettant une modélisation unifiée des théâtres d'opérations, intégrant des données multi-sources (capteurs, renseignements, systèmes d'armes) pour une prise de décision éclairée et synchronisée⁸¹. Ils facilitent la simulation de scénarios complexes (logistique, réactions adverses) et l'optimisation des manœuvres entre unités terrestres, aériennes et navales. La figure ci-dessous illustre ce jumeau numérique du champ de bataille où sont intégrées de nombreuses données : logistique, environnement, composantes, renseignement. Une partie de ces données peuvent être récupérées lors d'entraînements réels.

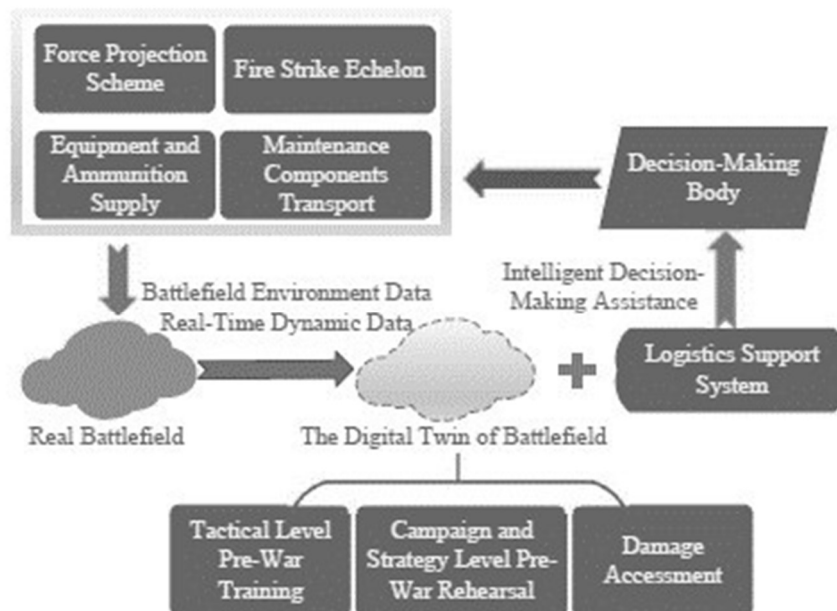


Figure 5 : Jumeau numérique du champ de bataille⁸²

L'apport de l'intelligence artificielle à ces plateformes ouvre des perspectives inédites en matière de planification prédictive⁸³. Les algorithmes de *deep learning* analysent des volumes massifs de données

⁷⁹ CENJOWS, *op. cit.*

⁸⁰ EUROPEAN DEFENCE AGENCY, 24 février 2025. New EDA project to enhance automatic 3D modelling for military situational awareness. In : European Defence Agency [en ligne]. Disponible sur : <https://eda.europa.eu/news-and-events/news/2025/02/24/new-eda-project-to-enhance-automatic-3d-modelling-for-military-situational-awareness>

⁸¹ CENJOWS, *op. cit.*

⁸² LI, SULIANG, QILIANG YANG, JIANCHUN XING, SHENGGUI YUAN, 2020, Preliminary Study on the Application of Digital Twin in Military Engineering and Equipment In : IEEE [en ligne]. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/systems9040082>

⁸³ DEFENSE BUSINESS BOARD, 29 février 2024. Creating A Digital Ecosystem. In : Defense Business Board [en ligne]. Disponible sur : <https://dbb.defense.gov/Portals/35/Documents/Reports/2024/FY24->

historiques et en temps réel pour détecter des corrélations invisibles à l'analyse humaine, modéliser des cascades d'événements probables et prescrire des séquences d'actions optimales. Leurs applications opérationnelles couvrent l'optimisation dynamique des itinéraires logistiques sous contraintes adverses, la prédiction des besoins en maintenance préventive ou l'identification des vulnérabilités dans les dispositifs défensifs ennemis.

Les défis techniques et organisationnels restent néanmoins substantiels. L'interopérabilité entre systèmes hétérogènes exige l'adoption urgente d'une taxonomie numérique unifiée (méthode de classification des informations) au sein de l'écosystème de défense⁸⁴. L'absence actuelle de standards sémantiques communs entrave l'échange fluide de données entre les différents acteurs institutionnels et industriels. La résolution de cet enjeu stratégique nécessite la création d'un cadre normatif contraignant, élaboré conjointement par les états-majors, les directions d'armement et les consortiums industriels spécialisés. Cette collaboration doit s'accompagner d'une gouvernance centralisée des architectures informatiques pour garantir leur cohérence évolutive face aux mutations technologiques accélérées.

En effet, la normalisation technique représente un impératif incontournable. La définition de protocoles d'interface universels pour les flux de données opérationnelles s'avère cruciale pour synchroniser les écosystèmes numériques militaires. Cette standardisation doit impérativement intégrer des mécanismes de sécurité renforcés contre les cybermenaces sophistiquées, tout en maintenant une flexibilité suffisante pour s'adapter aux innovations technologiques émergentes. L'établissement de référentiels communs pour le chiffrement des données sensibles et l'authentification robuste des utilisateurs constitue une condition *sine qua non* de déploiement sécurisé.

Les résistances culturelles constituent un obstacle parallèle nécessitant une attention particulière. L'adoption des jumeaux virtuels implique une transformation profonde des doctrines militaires. Cette transition exige la mise en place de programmes de certification numérique obligatoires, d'intégration et de valorisation des compétences technologiques dans les critères d'avancement hiérarchique, et de création de cellules d'innovation transversales réunissant militaires opérationnels et ingénieurs civils. La réussite de cette mutation culturelle passe par une pédagogie permanente qui souligne les gains opérationnels tangibles.

Le déploiement efficace des jumeaux virtuels dans la conduite des opérations militaires exige une approche articulant investissements technologiques ciblés, transformation culturelle progressive et normalisation technique contraignante. Bien que complexes, ces trois facteurs conditionnent la capacité des armées à maintenir leur supériorité opérationnelle dans un environnement géopolitique en mutation rapide. La maîtrise intégrale de ces technologies pourrait constituer un différentiateur décisif dans les conflits asymétriques et de haute intensité du XXI^e siècle.

3.4 Cybersécurité et défense des systèmes d'information

La sophistication croissante des cybermenaces impose une adaptation permanente des doctrines défensives, où les jumeaux numériques émergent comme des outils nouveaux pour la sécurisation des systèmes d'information militaires⁸⁵. Ces répliques virtuelles de dispositifs physiques permettent une gestion anticipative des risques et une protection renforcée des infrastructures critiques.

Ces doubles digitaux permettent la reproduction de scénarios d'agression cyber dans des environnements contrôlés. Les équipes de sécurité peuvent ainsi éprouver diverses tactiques défensives sur des réseaux militaires virtuels, identifiant les vulnérabilités sans exposer les systèmes opérationnels⁸⁶. Des simulations d'attaques par rançongiciel sur des jumeaux de réseaux révèlent par exemple les failles des protocoles cryptographiques, permettant leur renforcement.

[03%20Digital%20Ecosystem%20-%20FINAL%20FOR%20PRINT%20with%20DOPSR%20Stamp%204-16-24.pdf](#)

⁸⁴ Id.

⁸⁵ TECHUK, 15 avril 2024. Leveraging digital twins in cyber defense. In : techUK [en ligne]. Disponible sur : <https://www.techuk.org/resource/leveraging-digital-twins-in-cyber-defense.html>

⁸⁶ RSA CONFERENCE, 19 septembre 2024. How Digital Twins Are Transforming Cybersecurity Defense and Threat Detection. In : RSA Conference [en ligne]. Disponible sur :

L'intégration de l'intelligence artificielle amplifie les capacités de détection des jumeaux numériques. Les algorithmes analysent en flux continu les données issues des capteurs, repérant des motifs anormaux susceptibles de détecter des intrusions. Cette vigilance algorithmique permet une réaction en temps quasi-réel aux incidents, réduisant l'impact des brèches potentielles.

Sur le plan pédagogique, ces dispositifs virtuels transforment la formation en cybersécurité. Les spécialistes s'exercent à contrer des menaces émergentes dans des simulations hyperréalistes, aiguisant leurs réflexes face aux techniques d'attaque contemporaines⁸⁷. Ces environnements permettent aussi de valider les correctifs logiciels et mises à jour critiques avant leur implémentation sur les systèmes réels, limitant les risques de dysfonctionnements opérationnels.

L'implémentation de ces technologies soulève néanmoins des défis majeurs. La sécurisation intrinsèque des jumeaux numériques s'avère cruciale : leur compromission offrirait aux adversaires une cartographie détaillée des systèmes physiques⁸⁸. Des mesures drastiques s'imposent – chiffrement des flux, authentification biométrique renforcée, architectures *zero trust* – pour préserver l'intégrité de ces répliques virtuelles.

La gouvernance des données sensibles alimentant les jumeaux nécessite un cadre strict. Des protocoles doivent régir leur collecte, stockage et partage, garantissant leur inviolabilité tout au long du cycle de vie numérique. La complexité technique et le coût financier de ces infrastructures virtuelles constituent par ailleurs des freins notables, particulièrement pour les organisations aux ressources limitées.

Malgré ces obstacles, l'apport des jumeaux numériques à la cyberdéfense militaire demeure substantiel. Leur capacité à modéliser des menaces complexes, détecter des intrusions furtives et orchestrer des contre-mesures rapides renforce la sécurité. La *Defense Logistics Agency* (DLA), agence de soutien logistique de combat des États-Unis, explore cette approche en créant des jumeaux numériques cyber pour ses systèmes de technologie opérationnelle⁸⁹.

La pérennité de ces systèmes exige une approche systémique conjuguant sécurité informatique renforcée et protection des données souveraines. En surmontant ces défis, les armées peuvent exploiter pleinement le potentiel des jumeaux numériques pour sécuriser leurs architectures informationnelles dans un contexte géostratégique de plus en plus conflictuel.

3.5 Conception des programmes futurs

L'intégration des jumeaux numériques révolutionne en profondeur la conception des programmes militaires en rationalisant les processus de conception et en maîtrisant les coûts afférents. Ces doubles virtuels de systèmes complexes constituent des plateformes expérimentales permettant de valider des configurations multiples avant leur déploiement opérationnel. Dans le secteur aéronautique militaire, cette technologie autorise la simulation de profils de vol réalistes et l'analyse du comportement des appareils dans des scénarios tactiques variés. Cette faculté s'avère déterminante pour le développement de nouveaux modèles, où les dépenses liées aux prototypes physiques et aux essais en conditions réelles atteignent des sommets. L'US Air Force illustre cette dynamique avec le T-7A Red Hawk⁹⁰, avion d'entraînement de cinquième génération fruit d'un partenariat entre Boeing et Saab, dont le cycle de développement – de la conception au premier vol – aura été bouclé en seulement trente-six mois.

<https://www.rsaconference.com/library/blog/how-digital-twins-are-transforming-cybersecurity-defense-and-threat-detection>

⁸⁷ CENJOWS, *op. cit.*

⁸⁸ RSA CONFERENCE, *op. cit.*

⁸⁹ DLA INFORMATION OPERATIONS, 12 décembre 2024. Small business research projects explore technology to help detect cyber threats. In : DLA.mil [en ligne]. Disponible sur : <https://www.dla.mil/About-DLA/News/News-Article-View/Article/3980680/small-business-research-projects-explore-technology-to-help-detect-cyber-threats/>

⁹⁰ THALES GROUP, date non communiquée. Le miroir magique version 4.0. In : Thales Group [en ligne]. Disponible sur : <https://www.thalesgroup.com/fr/group/innovation/news/le-miroir-magique-version-40>

La pertinence des jumeaux numériques dans le domaine militaire suscite toutefois des interrogations. Interrogé sur les différences de stratégie de conception entre le SCAF et ses équivalents américains et britanniques, Joël Barre, ancien délégué général pour l'armement, nuance leur portée réelle lors d'une audition parlementaire en 2023⁹¹ : « *Ces maquettes virtuelles ne peuvent restituer intégralement les imprévus inhérents aux essais en vol réels* ». Un juste milieu est donc à rechercher pour déverminer les problèmes qui pourraient être rencontrés lors de la phase d'essais et les tests réels.

L'industrie de défense réalise néanmoins des avancées concrètes. Thales, par exemple, déploie son projet DigitalTwin Multiphysique pour optimiser la conception de sous-ensembles matériels via une modélisation anticipative. Christophe Dumas, directeur général adjoint en charge des opérations chez Thales, souligne l'impact de ces outils : « *L'adoption des jumeaux numériques accélère les phases d'intégration technique tout en simplifiant la modélisation des architectures système* »⁹². Cette approche innovante trouve une concrétisation opérationnelle dans le projet MELISSA, solution de communications satellitaires sécurisées développée par Thales pour équiper les avions ravitailleurs de l'armée française. Le jumeau numérique associé à ce programme facilite notamment la validation des interfaces entre les sous-ensembles électroniques et les systèmes embarqués, réduisant ainsi les risques de non-conformité lors des phases de tests physiques.

Dans le domaine terrestre, le projet NumCo de jumeau numérique du Véhicule blindé de combat d'infanterie (VBCI)⁹³, déjà abordé dans le paragraphe 3.2, permet aux équipes de l'industrie et de l'armée de collaborer sur un double virtuel du véhicule, soutenant à la fois les activités d'ingénierie et de maintenance prédictive. Ces avancées technologiques novatrices constituent le cœur des structures numériques pour les véhicules de combat de demain. Parallèlement, l'armée de Terre a organisé en 2023 le challenge COHOMA II, centré sur la collaboration entre opérationnels et industriels⁹⁴. Cette initiative a permis de tester des solutions techniques innovantes, illustrant la complémentarité entre expertise militaire et savoir-faire civil. Les jumeaux numériques offrent un terreau favorable à ce type de collaboration, en permettant de tester en boucle courte de nombreuses idées.

Le programme WeaponONE (W1) de l'US Air Force Research Laboratory (AFRL) montre un exemple d'agilité dans les évolutions incrémentales grâce aux jumeaux numériques⁹⁵. Ce programme utilise un jumeau virtuel du prototype d'arme collaborative "Gray Wolf". Ce jumeau numérique, intégrant des capacités d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique, permet de déterminer des améliorations pour son homologue physique en quasi temps réel ou dans le cycle de 24 heures de l'Air Tasking Order (ATO). Cette approche offre une flexibilité et une adaptabilité sans commune mesure aux systèmes d'armement.

Ainsi, l'adaptation des jumeaux numériques aux forces armées présente des avantages tangibles : réduction du temps et des coûts de développement, réduction des essais par prototype physique, prise en compte dès la phase de conception de la maintenance prédictive, agilité dans les évolutions incrémentales. Toutefois, comme le souligne Joël Barre, ces outils ne sauraient remplacer entièrement les essais physiques et les validations en conditions réelles. L'avenir de cette technologie réside dans son articulation avec l'expertise humaine traditionnelle, combinant innovation numérique et validation terrain pour garantir la fiabilité des systèmes de défense.

⁹¹ OPEX360, 8 novembre 2020. SCAF : Le Délégué général pour l'armement n'est pas convaincu par le concept de jumeau numérique. In : OPEX360 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.opex360.com/2020/11/08/scaf-le-delegue-general-pour-larmement-nest-pas-convaincu-par-le-concept-de-jumeau-numerique/>

⁹² THALES GROUP, *op. cit.*

⁹³ KNDS, 12 février 2024. Lancement de l'expérimentation du premier jumeau numérique de l'armement terrestre. In : KNDS [en ligne]. Disponible sur : <https://knds.fr/actualites/nos-dernieres-actualites/lancement-de-lexperimentation-du-premier-jumeau-numerique-de>

⁹⁴ MINISTÈRE DES ARMÉES, 2023. LPM 2024-2030 : une nécessité réaffirmée de l'innovation. In : Ministère des Armées [en ligne]. Disponible sur : <https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/aid/DrOID%202023.pdf>

⁹⁵ AIR FORCE RESEARCH LABORATORY PUBLIC AFFAIRS, 21 janvier 2021. WeaponONE demonstrates Digital Twin technologies that deliver software-defined weapon capabilities to the battlefield. In : Air Force Research Laboratory [en ligne], p. 20. Disponible sur : <https://www.afrl.af.mil/News/Article-Display/Article/2477959/weaponone-demonstrates-digital-twin-technologies-that-deliver-software-defined/>

3.6 Considérations budgétaires

L'intégration des jumeaux numériques dans l'écosystème militaire exige une évaluation financière sérieuse, en comparant les gains opérationnels escomptés et les économies sur le long terme en regard des investissements initiaux nécessaires. Le *National Institute of Standards and Technology* (NIST), une agence du Département du Commerce des États-Unis, chiffre à 37,9 milliards de dollars par an⁹⁶ l'impact économique potentiel de ces technologies pour le secteur manufacturier, sous condition d'un déploiement à large échelle. Ce montant agrège les économies générées par la maintenance prédictive, l'optimisation des opérations et l'accélération des cycles de recherche et développement, comme l'illustre la figure ci-dessous.

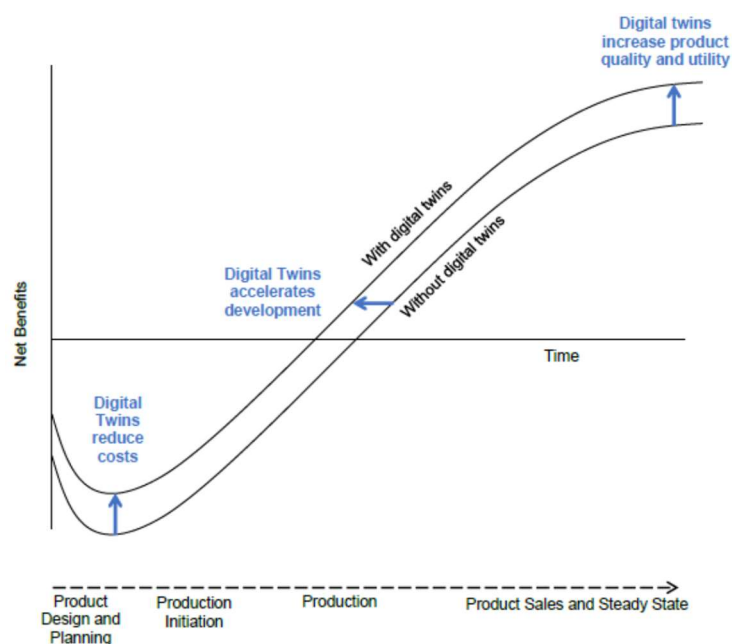


Figure 6 : Illustration des bénéfices apportés par les jumeaux numériques dans le secteur manufacturier⁹⁷

Le domaine militaire suit cette tendance : un rapport Capgemini⁹⁸ indique que 2,7 % des revenus annuels des industriels de l'aérospatial et de l'armement sont désormais attribués aux jumeaux numériques, marquant une progression de 40 % sur un an. Le budget 2024 du Département de la Défense américain illustre ces priorités, avec 58,5 milliards de dollars destinés aux technologies informatiques et à la cybersécurité⁹⁹, englobant des projets structurants de jumeaux numériques, bien que leur ventilation précise reste non communiquée.

Cinq domaines prioritaires guident l'usage des jumeaux numériques, basés sur les ventes de logiciels : maintenance prédictive (39,9 %), optimisation des activités (25,3 %), surveillance des performances (17,8 %), gestion des stocks (11,9 %) et développement de produits (3,4 %)¹⁰⁰. Dans le secteur de la maintenance, l'US Air Force a observé une diminution de 30 % des périodes d'indisponibilité des F-16

⁹⁶ NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2023. Economics of Digital Twins. In : NIST [en ligne]. 71 p., p.5. Disponible sur : https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=958153, 71 p., p. 48

⁹⁷ *Ibid.*, p. 9

⁹⁸ CAPGEMINI, 13 avril 2022. Digital Twins in Aerospace and Defense. In : Capgemini [en ligne]. Disponible sur : <https://prod.ucwe.capgemini.com/wp-content/uploads/2023/05/Final-Web-Version-Report-Digital-Twins-in-AD.pdf>

⁹⁹ OPENIT, 24 septembre 2024. Optimized Digital Engineering: A US Army Imperative. In : OpenIT [en ligne]. Disponible sur : <https://openit.com/optimized-digital-engineering-a-us-army-imperative/>

¹⁰⁰ NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, *op. cit.*, p. 11

grâce à l'emploi de jumeaux numériques pour prévoir les défaillances¹⁰¹. Ces avancées entraînent à la fois des économies directes et une amélioration notable de la disponibilité opérationnelle des appareils.

La phase de conception bénéficie particulièrement de cette technologie. D'après les données de Siemens, les entreprises aéronautiques qui utilisent des jumeaux numériques ont amélioré le rendement du premier passage à 75 % pour les conceptions, réduisant ainsi les essais physiques de 25 %¹⁰². Le programme britannique Tempest, dédié à un avion de combat de sixième génération, matérialise cette dynamique en se servant des jumeaux numériques¹⁰³ pour diviser par deux les coûts et délais par rapport aux programmes traditionnels¹⁰⁴. Cette accélération permet une adaptation rapide face aux menaces évolutives.

Sur le plan opérationnel, le *Centre for Joint Warfare Studies* quantifie entre 15 et 25 % la réduction des coûts logistiques grâce à la simulation de scénarios complexes¹⁰⁵. Les environnements virtuels de formation, en substitution partielle aux exercices terrain, diminuent également les dépenses en carburant et usure matérielle.

Cependant, les obstacles financiers restent substantiels. Les leaders du marché tels qu'Aveva, Siemens, Dassault Systems, Ansys, Bentley et Altair proposent des solutions de jumeaux numériques avec des frais de licence annuels de l'ordre de dizaines de milliers de dollars¹⁰⁶. Pour l'armée américaine, où les opérations classifiées exigent des solutions personnalisées et hautement sécurisées, ces coûts augmentent encore. GMSPAZIO estime entre 2 et 5 millions de dollars le coût de développement d'un jumeau numérique pour un système d'arme complexe¹⁰⁷, auxquels s'ajoutent les dépenses annuelles pour maintenance et mises à jour. Une enquête auprès de dirigeants de nombreux secteurs¹⁰⁸ révèle que 86 % des organisations dépensent plus d'un million de dollars annuels sur ces technologies, incluant modélisation, intégration et formation¹⁰⁹. Les coûts d'investissement dans les jumeaux numériques sont illustrés en fonction de la précision, de l'exactitude et de la flexibilité du modèle. Plus le modèle est précis, exact et flexible, plus il est coûteux.

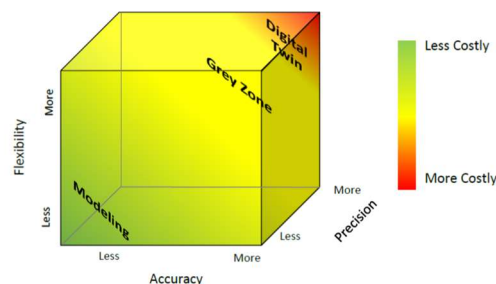


Figure 7 : Illustration des coûts d'investissement des jumeaux numériques en fonction de la précision, de l'exactitude et de la flexibilité du modèle¹¹⁰

¹⁰¹ CAPGEMINI, *op. cit.*

¹⁰² NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, *op. cit.*, 71 p., p. 43

¹⁰³ BMT, février 2021. Digital Twins - BMT.org. In : BMT [en ligne]. Disponible sur : <https://www.bmt.org/media/5571/bmt-das-newsletter-digital-twin-february-2021-uk-eu-289x380mm.pdf>

¹⁰⁴ LES ECHOS, 22 juillet 2020, Le Royaume-Uni lance la conception de son futur avion de combat Tempest. In : Les Echos [en ligne]. Disponible sur : <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/le-royaume-uni-lance-la-conception-de-son-futur-avion-de-combat-tempest-1935322>

¹⁰⁵ CENJOWS, *op. cit.*

¹⁰⁶ OPENIT, 24 septembre 2024. Optimized Digital Engineering: A US Army Imperative. In : OpenIT [en ligne]. Disponible sur : <https://openit.com/optimized-digital-engineering-a-us-army-imperative/>

¹⁰⁷ GMSPAZIO, 6 septembre 2024. The Economic Efficiency of Modeling & Simulation and Digital Twins in Aerospace and Defense. In : GMSPAZIO [en ligne]. Disponible sur : <https://findyourobject.gmspazio.com/en/en/art/11/5280/the-economic-efficiency-of-modeling-simulation-and-digital-twins-in-the-aerospace-and-defense.aspx>

¹⁰⁸ Secteurs de l'aérospatiale, de la défense, de l'automobile, des dispositifs médicaux, du pétrole/gaz et de l'électronique grand public

¹⁰⁹ NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, *op. cit.*, 71 p., p. 53

¹¹⁰ NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, *op. cit.*, 71 p., p. 22

Face à ces considérations, les forces armées doivent prioriser l'utilisation des jumeaux numériques pour les applications offrant le meilleur retour sur investissement. Les systèmes complexes à haute valeur ajoutée, tels que les avions de combat, les navires de guerre ou les réseaux de commandement et de contrôle, justifient pleinement l'investissement dans des jumeaux numériques complets. Pour ces systèmes, les bénéfices en termes de réduction des coûts de cycle de vie, d'amélioration des performances et de prolongation de la durée de service compensent largement les investissements initiaux.

Par ailleurs, des économies dans les coûts de production est à rechercher. Le Centre de jumeaux numériques du Royaume-Uni, situé à Belfast, en Irlande du Nord, a été lancé le 1er mai 2024 dans un programme de 5 ans visant à faire progresser l'application des jumeaux numériques au Royaume-Uni¹¹¹. Ce centre vise à réduire le coût de production d'un jumeau numérique de 50% pour raccourcir le temps de mise sur le marché, réduire les coûts et accélérer la croissance.

En synthèse, l'équation économique des jumeaux numériques militaires repose sur un arbitrage entre coûts initiaux élevés et gains conséquents à moyen terme. Les armées modernes doivent adopter une logique d'investissement différenciée, concentrant leurs efforts sur les systèmes où le retour sur investissement dépasse clairement les seuils critiques – généralement ceux combinant complexité technologique, durée de vie étendue et impact stratégique.

Si l'analyse budgétaire démontre la nécessité d'arbitrages pour concilier investissements et retours opérationnels, elle ne saurait occulter les défis systémiques inhérents à l'adoption des jumeaux numériques dans les armées. Les choix financiers, qu'ils concernent la priorisation des systèmes critiques ou l'allocation des ressources cloud, conditionnent directement la capacité à surmonter les obstacles technologiques et organisationnels. Ainsi, la réduction des coûts de cycle de vie via les jumeaux numériques, bien que prometteuse, se heurte à des enjeux de sécurité des données et d'interopérabilité OTAN. C'est à l'aune de ces tensions – entre rationalisation budgétaire et exigences opérationnelles – que s'articulera l'examen des défis résiduels et des opportunités émergentes.

3.7 Relever les défis et saisir les opportunités

L'intégration des jumeaux numériques dans les architectures de défense contemporaines oppose obstacles techniques et opportunités stratégiques, nécessitant une synergie méthodique. La concrétisation de ces potentialités exige une approche équilibrée, articulant rigueur opérationnelle et adaptation progressive.

L'interopérabilité des systèmes constitue le défi technologique nodal. Les travaux de l'OTAN soulignent l'impératif d'uniformiser les architectures logicielles entre nations alliées¹¹², particulièrement pour les plateformes multinationales comme les chasseurs F-35 ou les systèmes de défense antiaérienne. Cette harmonisation faciliterait tant l'échange de données tactiques que la maintenance coordonnée des équipements. L'adoption de normes communes – à l'image du protocole HLA (High-Level Architecture)¹¹³ – permettrait des interactions fluides entre jumeaux numériques hétérogènes. Le Royaume-Uni matérialise cette logique via son « National Digital Twin Programme »¹¹⁴, dont le cadre normatif unifié intègre acteurs gouvernementaux et industriels autour d'objectifs partagés.

¹¹¹ DIGITAL CATAPULT, 1er mai 2024. Revolutionary £37.6m UK Digital Twin Centre announced for Belfast. In : Digital Catapult [en ligne]. Disponible sur : <https://www.digicatapult.org.uk/about/press-releases/post/revolutionary-uk-digital-twin-centre-announced-for-belfast/>

¹¹² NATO STO, 9 janvier 2025. Under the Hood of The UK Digital Twin Centre - NATO STO. In : NATO Science and Technology Organization [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-MSG-217/MP-MSG-217-07.pdf>

¹¹³ architecture standardisée pour la simulation distribuée, développée initialement dans les années 1990 par le Département de la Défense américain et devenue par la suite une norme ouverte et internationale

¹¹⁴ CENTRE FOR DIGITAL BUILT BRITAIN, date non communiquée. National Digital Twin Programme. In : Centre for Digital Built Britain [en ligne]. Disponible sur : <https://www.cdabb.cam.ac.uk/what-we-do/national-digital-twin-programme>

La sécurisation des flux informationnels des jumeaux numériques militaires est cruciale face aux cybermenaces croissantes. Un rapport de TechUK, association professionnelle représentant l'industrie technologique au Royaume-Uni, souligne les risques de manipulation des boucles de rétroaction entre systèmes physiques et numériques, pouvant entraîner des dysfonctionnements graves¹¹⁵. Pour y remédier, l'organisme recommande l'intégration de mécanismes de sécurité dès la conception, le durcissement logiciel des composants critiques et des tests systématiques. La gestion stricte des accès, basée sur les privilèges, et l'utilisation de la *blockchain* pour sécuriser les interactions sont également préconisées, illustrant l'importance d'une approche proactive dans la protection des jumeaux numériques militaires.

L'intégration organisationnelle des jumeaux numériques implique une transformation profonde des doctrines militaires. Les recherches de l'Agence européenne de défense mettent en exergue la nécessité d'aligner les outils numériques sur les scénarios d'application les plus pertinents¹¹⁶. Une consultation systématique des états-majors permettrait de prioriser les cas d'usage – optimisation logistique, simulation de théâtres d'opérations combinées – tout en rationalisant l'allocation des ressources. La création d'équipes hybrides, associant officiers supérieurs, ingénieurs systèmes et experts en science des données, s'avère cruciale pour orchestrer cette transition.

La formation des personnels constitue un pilier fondamental de cette évolution. Les travaux de recherche mettent en lumière le rôle clé des jumeaux numériques comme outils de formation immersifs¹¹⁷. Des simulateurs reproduisant des équipements déployés – radars embarqués, réseaux de communication opérationnels – optimisent l'acquisition de compétences techniques tout en acclimatant les opérateurs aux interfaces digitales. Cette double fonction pédagogique facilite une utilisation efficace en conditions réelles, atténuant les erreurs humaines lors des missions critiques.

La dynamique technologique actuelle, caractérisée par la fusion des jumeaux numériques et de l'intelligence artificielle, ouvre des perspectives stratégiques novatrices pour la défense. L'IA contribue à automatiser les processus complexes, à affiner la précision des modélisations et à éclairer les choix tactiques. En traitant les flux de données issus des jumeaux numériques, l'IA détecte des irrégularités et anticipe les pannes matérielles¹¹⁸. Les institutions militaires peuvent ainsi repenser leurs méthodologies décisionnelles : transition d'une logique déterministe (plans fondés sur des informations connues) vers une approche probabiliste (stratégies adaptatives ajustées en continu via des simulations et des données en temps réel). Cette symbiose technologique permet également d'élaborer des scénarios d'entraînement plus réalistes, offrant aux chefs militaires la capacité d'expérimenter diverses tactiques et de se préparer à des éventualités multiples.

Cependant, l'intégration de l'IA aux jumeaux numériques dans le champ militaire soulève des dilemmes éthiques majeurs. L'exploitation de jumeaux numériques humains suscite des interrogations cruciales sur la confidentialité des données, la cybersécurité et le consentement éclairé. Ces modèles virtuels nécessitent parfois l'accès à des informations sensibles – biométriques, comportementales ou cognitives – dont une utilisation détournée pourrait engendrer des risques individuels et stratégiques graves¹¹⁹. Par ailleurs, la fiabilité et la transparence des modèles s'imposent comme des impératifs, car des décisions fondées sur des simulations erronées risqueraient d'avoir des conséquences irréversibles.

¹¹⁵ TECHUK, 15 avril 2024. Leveraging Digital Twins in Cyber Defense. In : techUK [en ligne]. Disponible sur : <https://www.techuk.org/resource/leveraging-digital-twins-in-cyber-defense.html>

¹¹⁶ FLYSIGHT, 2025. Explore Defence Digital Twins: EDDI EDA Study for the Next Four Years. In : FlySight [en ligne]. Disponible sur : <https://www.flysight.it/explore-defence-digital-twins-eddi-eda-study-for-the-next-four-years/>

¹¹⁷ CAPGEMINI, *op. cit.*

¹¹⁸ DELOITTE, 18 octobre 2024. New uses for digital twins in the race to navigate an uncertain future. In : Deloitte Insights [en ligne]. Disponible sur : <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/topics/strategy/racing-digital-twin-technology.html>

¹¹⁹ NATO STO, 2025. Technologies for Developing Warfighter Digital Twins with Biomechanics and Physiology. In : NATO Science and Technology Organization [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-HFM-MSG-375/MP-HFM-MSG-375-07.pdf>

L'instauration de cadres éthiques stricts et de dispositifs de supervision robustes apparaît donc indispensable pour encadrer ces technologies.

En définitive, le succès des jumeaux numériques dans le domaine militaire dépend d'un équilibre subtil : adopter les avancées technologiques sans compromettre la sécurité, moderniser les processus sans évincer la responsabilité humaine. Cet équilibre reste réalisable – sous réserve d'efforts soutenus et d'une vigilance accrue.

3.8 Quelles recommandations pour maximiser les bénéfices ?

L'intégration optimale des jumeaux numériques au sein des forces armées exige une démarche systémique articulant divers leviers d'action. Les recommandations suivantes, structurées en quatre axes prioritaires, visent à concilier innovation technologique et pragmatisme opérationnel dans un contexte de ressources limitées et de défis géostratégiques croissants.

3.8.1 Investissements stratégiques et priorisation nécessaire

1.1. Définir un plan directeur opérationnel hiérarchisant les applications critiques (ex : maintenance prédictive des aéronefs, gestion des satellites) et les projets expérimentaux (ex : simulations de cyberattaques massives), avec des jalons précis sur 5 à 10 ans.

1.2. Allouer une part ambitieuse du budget défense aux jumeaux numériques afin de sécuriser les financements pluriannuels.

1.3. Instituer un conseil stratégique interarmées réunissant hauts gradés et experts techniques pour arbitrer les investissements, éviter les redondances entre branches militaires, et aligner les choix sur la doctrine opérationnelle.

3.8.2 Développement de partenariats avec le secteur civil et international pour bénéficier des avancées technologiques et renforcer les synergies.

2.1. Accélérer les coopérations public-privé avec des acteurs clés (Thales, Dassault Aviation, etc.) pour mutualiser les coûts de R&D et accéder à des briques technologiques civiles matures.

2.2. Standardiser les protocoles OTAN via des groupes de travail permanents dédiés aux jumeaux numériques, en défendant les éventuelles spécificités françaises.

2.3. Créer un écosystème d'innovation de type « *National Security Technology and Innovation Exchange* » (NSTIx), sur le modèle britannique¹²⁰, combinant essais en conditions réelles et transferts de savoir-faire entre militaires et civils.

2.4. Développer un cadre spécifique aux jumeaux numériques militaires, établissant des accords de propriété intellectuelle et des règles d'accès aux données sensibles.

3.8.3 Standardisation des protocoles et des systèmes, gestion centralisée des données et des infrastructures.

3.1. Adopter le protocole HLA (*High-Level Architecture*) de l'OTAN comme norme obligatoire pour les simulations distribuées, garantissant l'interaction entre jumeaux numériques hétérogènes.

3.2. Déployer une plateforme centralisée de gestion des données militaires sensibles, intégrant des mécanismes de chiffrement homologués.

3.3. Élaborer un cadre réglementaire strict pour les données tactiques et biométriques, précisant les règles de collecte (durée maximale de conservation), de partage (niveaux de classification OTAN) et de destruction (protocoles certifiés).

¹²⁰ NATIONAL SECURITY TECHNOLOGY AND INNOVATION EXCHANGE, décembre 2022. Strategic Intent of the National Security Technology and Innovation Exchange. In : GOV.UK [en ligne]. Disponible sur : <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/63a0967dd3bf7f37569892ef/20221214-NSTIx-Strategic-Intent-O.pdf>

3.8.4 *Formation et adaptation du personnel*

4.1. Intégrer les jumeaux numériques aux cursus des écoles militaires via des modules théoriques et des ateliers sur simulateurs.

4.2. Lancer un programme « *DigiSkill* » de reconversion accélérée (6 mois) pour les personnels techniques, combinant *MOOC*¹²¹ spécialisés et stages en unités équipées de jumeaux numériques.

4.3. Constituer des task-forces hybrides mélangeant officiers (expérience terrain), ingénieurs systèmes (expertise technique) et data scientists (maîtrise algorithmique).

La mise en œuvre de ces propositions nécessitera une volonté commune soutenue et un alignement parfait entre objectifs stratégiques, capacités technologiques et impératifs opérationnels. Seule une approche évolutive et itérative, intégrant systématiquement les retours d'expérience du terrain, permettra aux armées de tirer pleinement parti du potentiel disruptif des jumeaux numériques tout en préservant leur agilité et leur supériorité informationnelle.

¹²¹ *Massive Open Online Course*

Conclusion

La réflexion menée sur l'emploi des jumeaux numériques pour la modernisation des forces armées a permis d'explorer leur pertinence opérationnelle, les défis structurels et les opportunités stratégiques liés à leur adoption. Dans un premier temps, l'examen historique du concept de jumeau numérique a mis en évidence leur singularité par rapport aux modélisations traditionnelles. Contrairement aux simulations statiques, ces entités dynamiques intègrent une rétroaction permanente avec leurs homologues physiques via des flux de données. Cette connexion bidirectionnelle, rendue possible par l'IoT et l'edge computing, constitue leur caractéristique première.

Le deuxième volet a analysé les transpositions possibles depuis des secteurs civils pionniers. L'industrie aéronautique civile, avec ses jumeaux de maintenance prédictive, offre des enseignements précieux pour l'optimisation des cycles de maintien en conditions opérationnelles. Néanmoins, ces transferts nécessitent des adaptations majeures : durcissement cyber des architectures, gestion des données classifiées, gestion des droits de propriété intellectuelle.

La troisième phase a cartographié les apports concrets sur l'écosystème militaire contemporain.

L'influence des jumeaux numériques a été examinée sous plusieurs angles : réalisme des programmes d'entraînement via des simulateurs immersifs, amélioration des processus de maintenance par anticipation algorithmique, perfectionnement de la planification des opérations grâce à des modèles dynamiques, consolidation des défenses cybernétiques par simulation d'attaques, agilité dans la conception des futurs équipements. Chaque application illustre simultanément les avantages transformationnels et les obstacles techniques propres à ces systèmes.

Cette analyse révèle que les jumeaux numériques représentent une rupture technologique majeure pour les armées, offrant des gains opérationnels significatifs, une rationalisation des coûts logistiques et une meilleure préparation des troupes. Leur aptitude à traiter des données massives en temps quasi réel favorise des décisions mieux informées et une adaptabilité renforcée face aux menaces changeantes. Néanmoins, leur implantation rencontre des obstacles substantiels liés à la diversité des infrastructures existantes, aux vulnérabilités cyber accrues, aux questions éthiques posées par l'automatisation intensive, et aux transformations organisationnelles requises.

Au final, l'utilité des jumeaux numériques dépendra de la capacité des forces armées à préserver un équilibre délicat : exploiter l'agilité numérique pour soutenir – jamais substituer – le raisonnement humain.

Bibliographie

Ouvrage

JULIEN Nathalie, MARTIN Eric, *Le jumeau numérique, de l'intelligence artificielle à l'industrie agile*, Malakoff, Dunod, 2020, 232 p., p 95-96.

Rapports

BANQUE DES TERRITOIRES, juillet 2021, *Benchmark des jumeaux urbains*. In : Banque des Territoires [en ligne]. Disponible sur : https://www.banquedesterritoires.fr/sites/default/files/2021-07/benchmark_BDT_Juillet.pdf (p.47)

BENMILOUD, L. et BECHET, L., mai 2024. Digital Twin in the Energy Sector. In : Assystem [en ligne]. Disponible sur : <https://www.assystem.com/wp-content/uploads/2024/05/SOTA-REPORT-Benmiloud-Bechet-Lies-Digital-Twin-in-the-Energy-Sector.pdf>

BMT, février 2021. Digital Twins - BMT.org. In : BMT [en ligne]. Disponible sur : <https://www.bmt.org/media/5571/bmt-das-newsletter-digital-twin-february-2021-uk-eu-289x380mm.pdf>

CAPGEMINI, 13 avril 2022. Digital Twins in Aerospace and Defense. In : Capgemini [en ligne]. Disponible sur : <https://prod.ucwe.capgemini.com/wp-content/uploads/2023/05/Final-Web-Version-Report-Digital-Twins-in-AD.pdf>

DEFENSE BUSINESS BOARD, 29 février 2024. Creating A Digital Ecosystem. In : Defense Business Board [en ligne]. Disponible sur : <https://dbb.defense.gov/Portals/35/Documents/Reports/2024/FY24-03%20Digital%20Ecosystem%20-%20FINAL%20FOR%20PRINT%20with%20DOPSR%20Stamp%204-16-24.pdf>

ENEDIS, mars 2024, *Plan de développement des Smart Grids*. In : ENEDIS [en ligne]. Disponible sur : <https://www.enedis.fr/sites/default/files/documents/pdf/programme-de-rd-et-d-innovation-d-enedis.pdf>

FRANCE STRATÉGIE, février 2022. Le monde de l'Internet des objets : des dynamiques à maîtriser. In : France Stratégie [en ligne]. Disponible sur : <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2022-rapport-iot-fevrier.pdf>

GRIEVES, Michael, 2014. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. In : 3DS [en ligne]. Disponible sur : <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>

GRTgaz, décembre 2023, *Rapport d'activités RDI 2022*. In : GRTgaz [en ligne]. Disponible sur : <https://www.grtgaz.com/sites/default/files/ra/rapport-activite-rice-2023.pdf>

LEE, Eugene Boon Kien, VAN BOSSUYT, Douglas L. et BICKFORD, Jason F., 14 novembre 2021. L'aide à la décision numérique à double intention dans le domaine de l'ingénierie et de la planification des routes des missions. In : Systèmes [en ligne]. Vol. 9, n° 4, article 82. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/systems9040082>

LI, SULIANG, QILIANG YANG, JIANCHUN XING, SHENGGUI YUAN, 2020, Preliminary Study on the Application of Digital Twin in Military Engineering and Equipment In : IEEE [en ligne]. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/systems9040082>

MARKETSANDMARKETS. Digital Twin Market - Global Forecast to 2026, 2021. Disponible sur : <https://marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html>

MINISTÈRE DES ARMÉES, 2023. LPM 2024-2030 : une nécessité réaffirmée de l'innovation. In : Ministère des Armées [en ligne]. Disponible sur : <https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/aid/DrOID%202023.pdf>

MORDOR INTELLIGENCE, date non communiquée. Digital Twin Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2025-2030). In : Mordor Intelligence [en ligne]. Disponible sur : <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/digital-twin-market>

NASLIN, Maëlys, 17 mars 2022. La réalité étendue et les jumeaux numériques : quelles implications pour l'entraînement et la planification au sein de l'armée de Terre ? In : Ministère des Armées, Armée de Terre [en ligne]. Disponible sur : <https://www.terre.defense.gouv.fr/ccf/nos-publications/recherche-conflits/notes-recherche-sciences-technologies/realite-etendue-jumeaux-numeriques>

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2023. Economics of Digital Twins. In : NIST [en ligne]. 71 p., p.5. Disponible sur : https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=958153

NATIONAL SECURITY TECHNOLOGY AND INNOVATION EXCHANGE, décembre 2022. Strategic Intent of the National Security Technology and Innovation Exchange. In : GOV.UK [en ligne]. Disponible sur : <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/63a0967dd3bf7f37569892ef/20221214-NSTIx-Strategic-Intent-O.pdf>

NATO STO, 9 janvier 2025. Under the Hood of The UK Digital Twin Centre - NATO STO. In : NATO Science and Technology Organization [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-MSG-217/MP-MSG-217-07.pdf>

NATO STO, 2025. Technologies for Developing Warfighter Digital Twins with Biomechanics and Physiology. In : NATO Science and Technology Organization [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-HFM-MSG-375/MP-HFM-MSG-375-07.pdf>

RTE, 7 juin 2024, *Bilan R&D 2023*. In : RTE Publications [en ligne]. Disponible sur : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2024-06/2024-06-07-bilan-rd-2023.pdf>

SKINNER, Simon G., 2024. *Taking Simulation Interoperability Standards to the Next Level with Digital Twins*. In : NATO STO Publications [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-MSG-197/MP-MSG-197-25.pdf>.

SKINNER, Simon G., et PENA REGUEIRO, Iván, 2024. *Working on the Problem of Digital Twin Interoperability*. In : NATO STO [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-AVT-369/MP-AVT-369-29.pdf>

TEAM DEFENCE INFORMATION, 2021. Defence Digital Twin Implementation Road Map and Development Framework. In: Team Defence Information [en ligne]. Disponible sur : <https://www.teamdefence.info/wp-content/uploads/2022/03/20210121-Digital-Twin-Implementation-Road-Map-and-Development-Framework-White-Paper-V1.pdf>

UK GOVERNMENT, 2025. *Cloud Strategic Roadmap for Defence*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.gov.uk/government/publications/cloud-strategic-roadmap-for-defence/cloud-strategic-roadmap-for-defence>

Articles de revues

+972 MAGAZINE, 25 avril 2024. 'Lavender': The AI machine directing Israel's bombing spree in Gaza. In : +972 Magazine [en ligne]. Disponible sur : <https://www.972mag.com/lavender-ai-israeli-army-gaza/>

JAMES, Olivier, 24 avril 2020. Les avionneurs s'emparent du jumeau numérique. In : L'Usine Nouvelle [en ligne]. Disponible sur : <https://www.usinenouvelle.com/editorial/les-avionneurs-s-emparent-du-jumeau-numerique.N953846>

LES ECHOS, 22 juillet 2020, Le Royaume-Uni lance la conception de son futur avion de combat Tempest. In : Les Echos [en ligne]. Disponible sur : <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/le-royaume-uni-lance-la-conception-de-son-futur-avion-de-combat-tempest-1935322>

OPEX360, 8 novembre 2020. SCAF : Le Délégué général pour l'armement n'est pas convaincu par le concept de jumeau numérique. In : OPEX360 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.opex360.com/2020/11/08/scaf-le-delegue-general-pour-larmement-nest-pas-convaincu-par-le-concept-de-jumeau-numerique/>

OPEX360, 12 février 2024. Nexter et Arquus vont développer un « jumeau numérique » du Véhicule Blindé de Combat d'Infanterie. In : OPEX360 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.opex360.com/2024/02/12/nexter-et-arquus-vont-developper-un-jumeau-numerique-du-vehicule-blinde-de-combat-dinfanterie/>

LE JOURNAL DU NET, 15 mars 2023, *Les jumeaux numériques dans l'industrie manufacturière : une révolution pour les lignes de production*. In : Le Journal du Net [en ligne]. Disponible sur <https://www.journaldunet.com/iot/1538281-jumeaux-numeriques-dans-l-industrie-manufacturiere-une-revolution-pour-les-lignes-de-production/>

RIOUX Philippe, 28/10/2024, *Que sait-on sur le supercalculateur le plus puissant dédié à l'intelligence artificielle que construit la France ?*, In : La Dépêche [en ligne]. Disponible sur <https://www.ladepeche.fr/2024/10/28/un-coup-de-grace-que-sait-on-sur-le-supercalculateur-le-plus-puissant-dedie-a-lintelligence-artificielle-que-construit-la-france-12287529.php>

TUTHILL, Todd. *SIEMENS : Remplacer les prototypes physiques par le jumeau numérique*. In : Air & Cosmos [en ligne]. Disponible sur : <https://air-cosmos.com/article/siemens-remplacer-les-prototypes-physiques-par-le-jumeau-numerique-68329>

Sites web

AIR FORCE RESEARCH LABORATORY PUBLIC AFFAIRS, 21 janvier 2021. WeaponONE demonstrates Digital Twin technologies that deliver software-defined weapon capabilities to the battlefield. In : Air Force Research Laboratory [en ligne], p. 20. Disponible sur : <https://www.afrl.af.mil/News/Article-Display/Article/2477959/weaponone-demonstrates-digital-twin-technologies-that-deliver-software-defined/>

CENJOWS, 9 janvier 2025. Digital Transformation in Joint Warfighting- A 'Digital Twin' Use Case. In : Centre for Joint Warfare Studies [en ligne]. Disponible sur : <https://cenjows.in/digital-transformation-in-joint-warfighting-a-digital-twin-use-case/>

CENTRE FOR DIGITAL BUILT BRITAIN, date non communiquée. National Digital Twin Programme. In : Centre for Digital Built Britain [en ligne]. Disponible sur : <https://www.cdbb.cam.ac.uk/what-we-do/national-digital-twin-programme>

CEREMA, date non communiquée, Espace Numérique responsable Rennes Métropole. In : CEREMA [en ligne]. Disponible sur : <https://smart-city.cerema.fr/numerique-responsable/rennes-metropole>

CNRS, 6 juillet 2024, L'essor des jumeaux numériques face à leurs défis. In : CNRS Actualités [en ligne]. Disponible sur : <https://www.cnrs.fr/fr/actualite/lessor-des-jumeaux-numeriques-face-leurs-defis>

COCKERELL, Steve, 2025. Réinventer les aéroports de demain grâce aux jumeaux numériques. In : HexaBIM [en ligne]. Disponible sur : <https://www.hexabim.com/publications/reinventer-les-aeroports-de-demain-grace-aux-jumeaux-numeriques>

DEFENSE INNOVATION UNIT, pas de date. Predictive Maintenance. In : DIU Product Catalog [en ligne]. Disponible sur : <https://www.diu.mil/solutions/portfolio/catalog/a0Tt0000009En6aEAC-a0ht000000AYgyGAAT>

DELOITTE, 18 octobre 2024. New uses for digital twins in the race to navigate an uncertain future. In : Deloitte Insights [en ligne]. Disponible sur : <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/topics/strategy/racing-digital-twin-technology.html>

DIGITAL CATAPULT, 1er mai 2024. Revolutionary £37.6m UK Digital Twin Centre announced for Belfast. In : Digital Catapult [en ligne]. Disponible sur : <https://www.digicatapult.org.uk/about/press-releases/post/revolutionary-uk-digital-twin-centre-announced-for-belfast/>

DLA INFORMATION OPERATIONS, 12 décembre 2024. Small business research projects explore technology to help detect cyber threats. In : DLA.mil [en ligne]. Disponible sur : <https://www.dla.mil/About-DLA/News/News-Article-View/Article/3980680/small-business-research-projects-explore-technology-to-help-detect-cyber-threats/>

EUROPEAN DEFENCE AGENCY, 24 février 2025. New EDA project to enhance automatic 3D modelling for military situational awareness. In : European Defence Agency [en ligne]. Disponible sur : <https://eda.europa.eu/news-and-events/news/2025/02/24/new-eda-project-to-enhance-automatic-3d-modelling-for-military-situational-awareness>

F-INITIATIVES, 29 octobre 2024. Industrie 4.0 : Déverrouiller le potentiel des jumeaux numériques. In : F-initiatives [en ligne]. Disponible sur : <https://www.f-initiatives.com/actualites/rd/industrie-4-0-deverrouiller-le-potentiel-des-jumeaux-numeriques/>

FLYSIGHT, 2025. Explore Defence Digital Twins: EDDI EDA Study for the Next Four Years. In : FlySight [en ligne]. Disponible sur : <https://www.flysight.it/explore-defence-digital-twins-eddi-eda-study-for-the-next-four-years/>

FRENCHWEB.FR, 16 décembre 2024, Jumeaux numériques : La startup DEEPLIFE lève 10 millions d'euros pour faire entrer la biotech dans une nouvelle ère d'innovation thérapeutique. In : FrenchWeb.fr [en ligne]. Disponible sur <https://www.frenchweb.fr/jumeaux-numeriques-la-startup-deeplife-leve-10-millions-deuros-pour-faire-entrer-la-biotech-dans-une-nouvelle-ere-d-innovation-therapeutique>

GARTNER, 2024. Digital Twins Will Drive Innovation in Smart Cities. In : Gartner [en ligne]. Disponible sur : <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/digital-twins-will-drive-innovation-in-smart-cities>

GÉOLOGIE CANADA, 2023. Les jumeaux numériques dans l'exploration minière. In : Géologie Canada [en ligne]. Disponible sur : <https://www.geologiecanada.ca/jumeaux-numeriques-exploration-miniere>

GE VERNOVA, date non communiquée, *Digital Twin Technology*. In : GE Vernova [en ligne]. Disponible sur <https://www.gevernova.com/software/innovation/digital-twin-technology>

GMSPAZIO, 6 septembre 2024. The Economic Efficiency of Modeling & Simulation and Digital Twins in Aerospace and Defense. In : GMSPAZIO [en ligne]. Disponible sur : <https://findyourobject.gmspazio.com/en/en/art/11/5280/the-economic-efficiency-of-modeling-simulation-and-digital-twins-in-the-aerospace-and-defense.aspx>

HARVARD BUSINESS REVIEW, 2024. How Digital Twins Are Transforming Manufacturing. In : Harvard Business Review [en ligne]. Disponible sur : <https://hbr.org/2024/03/how-digital-twins-are-transforming-manufacturing>

HEXAGON, 2025. Building smarter cities with digital twin technology. In : Hexagon [en ligne]. Disponible sur : <https://hexagon.com/smart-cities-digital-twin>

HTEC Group, date non communiquée. Digital Twins in IoT: Past, Present, and Future. In : HTEC Group [en ligne]. Disponible sur : <https://htec.com/insights/blogs/digital-twins-in-iot/>

IBM, 2024. The Role of Digital Twins in the Energy Sector. In : IBM [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ibm.com/blogs/digital-twins-energy-sector>

INRIA, 2023. Jumeaux numériques et simulation numérique : défis et perspectives. In : INRIA [en ligne]. Disponible sur : <https://www.inria.fr/jumeaux-numeriques-simulation-defis-perspectives>

KNDS, 12 février 2024. Lancement de l'expérimentation du premier jumeau numérique de l'armement terrestre. In : KNDS [en ligne]. Disponible sur : <https://knds.fr/actualites/nos-dernieres-actualites/lancement-de-l experimentation-du-premier-jumeau-numerique-de>

MERITIS, 2 octobre 2024. Blockchain et jumeaux numériques : clés du développement durable. In : Meritis [en ligne]. Disponible sur : <https://meritis.fr/blog/blockchain-et-jumeaux-numeriques-une-revolution-pour-le-developpement-durable>

MICROSOFT, 2024. Empowering industries with Azure Digital Twins. In : Microsoft Azure Blog [en ligne]. Disponible sur : <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/empowering-industries-with-azure-digital-twins/>

MINISTÈRE DES ARMÉES (FRANCE), 2025. Les jumeaux numériques au cœur des stratégies de défense. In : Ministère des Armées [en ligne]. Disponible sur : <https://www.defense.gouv.fr/jumeaux-numeriques-strategies-defense>

MOSIMTEC, 2023. Model One: Revolutionizing Digital Twins in Military and Industry. In : MOSIMTEC [en ligne]. Disponible sur : <https://mosimtec.com/model-one-revolutionizing-digital-twins-in-military-and-industry/>

MOSTATHMR, 16 novembre 2023, *Le projet Virtual Singapore cartographie une ville entière en 3D*, In : Mostathmr [en ligne]. Disponible sur : <https://mostathmr.com/fr/themes/69868-the-virtual-singapore-project-is-mapping-out-an-entire-city>

NASA, 2023. Digital Twin Technology for Space Exploration. In : NASA [en ligne]. Disponible sur : <https://www.nasa.gov/digital-twin-technology-space-exploration>

NVIDIA, 2024. Omniverse and Digital Twins: The Future of Virtual Collaboration. In : NVIDIA Blog [en ligne]. Disponible sur : <https://blogs.nvidia.com/omniverse-digital-twins-future-collaboration>

OPENIT, 24 septembre 2024. Optimized Digital Engineering: A US Army Imperative. In : OpenIT [en ligne]. Disponible sur : <https://openit.com/optimized-digital-engineering-a-us-army-imperative/>

ORANGE BUSINESS SERVICES, 2024. Jumeaux numériques et IoT pour une industrie plus performante. In : Orange Business Services [en ligne]. Disponible sur : <https://www.orange-business.com/fr/blogs/jumeaux-numeriques-iot-industrie-performante>

PERFORMANCE DEFENSE, 13 février 2025. Data-Driven Defense: Predictive Maintenance for Military Aircraft. In : Performance Defense [en ligne]. Disponible sur : <https://performancedefense.com/data-driven-defense-predictive-maintenance-increasing-mission-readiness/>

PERRI, Lori, 10 août 2022. Quelles sont les nouveautés du Hype Cycle 2022 de Gartner consacré aux technologies émergentes ? In : Gartner [en ligne]. Disponible sur : <https://www.gartner.fr/fr/articles/quelles-sont-les-nouveautes-du-hype-cycle-2022-de-gartner-consacre-aux-technologies-emergentes>

RED ALERT LABS, 2025. Security Concerns for Military IoT Devices. In : Red Alert Labs [en ligne]. Disponible sur : <https://www.redalertlabs.com/blog/security-concerns-for-military-iot-devices>

RESTACKIO, 18 février 2025. Digital Twins In Military Tech. In : Restackio [en ligne]. Disponible sur : <https://www.restack.io/p/digital-twins-in-ai-answer-military-tech-apps-cat-ai>

RHEINMETALL, 27 avril 2023. E-Learning – Army: With digital training to mission readiness. In : Rheinmetall [en ligne]. Disponible sur : <https://www.rheinmetall.com/en/products/simulation-training/simulation-and-training/military-training-solutions/army/e-learning-army>

RSA CONFERENCE, 19 septembre 2024. How Digital Twins Are Transforming Cybersecurity Defense and Threat Detection. In : RSA Conference [en ligne]. Disponible sur : <https://www.rsaconference.com/library/blog/how-digital-twins-are-transforming-cybersecurity-defense-and-threat-detection>

SCHNEIDER ELECTRIC, 2 février 2023, *Smart factories and digital twins: Accelerating industrial transformation*. In : Schneider Electric Blog [en ligne]. Disponible sur <https://blog.se.com>

SHIP TNL, 7 novembre 2024. Digital Twins in Fleet Management: Real-Time Optimization Tools. In : Ship TNL [en ligne]. Disponible sur : <https://www.shiptnl.com/post/digital-twins-in-fleet-management-real-time-optimization-tools>

SIEMENS, 14 avril 2020, *Apollo 13: The first digital twin*. In : Simcenter Blog [en ligne]. Disponible sur <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>

SIEMENS, 28 mars 2023, *Remplacer les prototypes physiques par le jumeau numérique*. In : Air & Cosmos [en ligne]. Disponible sur : <https://air-cosmos.com/article/siemens-remplacer-les-prototypes-physiques-par-le-jumeau-numerique-68329>

SIEMENS, 2025. Unlocking the Potential of Digital Twins in Healthcare. In : Siemens Healthineers Blog [en ligne]. Disponible sur : <https://www.siemens-healthineers.com/digital-twins-healthcare>

SIEMENS, date non communiquée, *Getting the best out of production with the Digital Twin*. In : Siemens [en ligne]. Disponible sur <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/digital-enterprise/digital-transformers/electronics-factory-erlangen/digital-twin.html>

SIEMENS GOVERNMENT TECHNOLOGIES, date non communiquée. Digitalization for Defense. In: Siemens Government Technologies [en ligne]. Disponible sur: <https://www.siemensgovt.com/solutions/digitalization-for-defense> (illustration page de garde)

SIEMENS HEALTHINEERS, [sans date], *Digital Twins in Healthcare*. In : Siemens Healthineers [en ligne]. Disponible sur <https://www.siemens-healthineers.com/digital-health-solutions/digital-twin>

SILICON.FR, 2 février 2023. Comment EDF mise sur les jumeaux numériques pour construire ses futurs EPR. In : Silicon.fr [en ligne]. Disponible sur : <https://www.silicon.fr/Thematique/actualites-1367/Breves/Comment-EDF-mise-sur-les-jumeaux-numeriques-pour-construire-ses-402429.htm>

SMART INDUSTRY ALLIANCE, 2024. Digital Twin Adoption in Manufacturing: Challenges and Opportunities. In : Smart Industry Alliance [en ligne]. Disponible sur : <https://smartindustryalliance.org/digital-twin-adoption-manufacturing>

SOLIDWORKS, 10 octobre 2024, *L'histoire de la CAO : de la planche à dessin à la révolution numérique*. In : SolidWorks Blog [en ligne]. Disponible sur <https://blogs.solidworks.com/solidworksfrance/2024/10/lhistoire-de-la-cao-de-la-planche-a-dessin-a-la-revolution-numerique.html>

TECHUK, 15 avril 2024. Leveraging digital twins in cyber defense. In : techUK [en ligne]. Disponible sur : <https://www.techuk.org/resource/leveraging-digital-twins-in-cyber-defense.html>

TECHUKRAINE, 8 janvier 2025. Ukraine's Drone Revolution: AI-Powered, EW-Resistant, and Fiber Optic Innovations. In : TechUkraine [en ligne]. Disponible sur : <https://techukraine.org/2025/01/08/ukraines-drone-revolution-ai-powered-ew-resistant-and-fiber-optic-innovations/>

THALES, 2025. Les jumeaux numériques dans la cybersécurité et la défense. In : Thales Group [en ligne]. Disponible sur : <https://www.thalesgroup.com/fr/jumeaux-numeriques-cybersecurite-defense>

THALES, date non communiquée. Le miroir magique version 4.0. In : Thales Group [en ligne]. Disponible sur : <https://www.thalesgroup.com/fr/group/innovation/news/le-miroir-magique-version-40>

THE LOCATION LAB PVT LTD, Date non spécifiée. Digital Twins in Aerospace Industry. In : LinkedIn [en ligne]. Disponible sur : <https://www.linkedin.com/pulse/digital-twins-aerospace-industry-the-location-lab-pvt-ltd->

THE SCX CHANGE, 27 août 2024. How digital twins can transform trucking operations. In : The SCX Change [en ligne]. Disponible sur : <https://www.thescxchange.com/articles/10784-how-digital-twins-can-transform-trucking-operations>

THERMOS Alicia, 13 mars 2024. Jumeaux numériques : concept et applications. In : Kuzzle Blog [en ligne]. Disponible sur : <https://blog.kuzzle.io/fr/jumeaux-numeriques-iot>

TNO (NETHERLANDS ORGANISATION FOR APPLIED SCIENTIFIC RESEARCH), 2024. The Role of Digital Twins in Urban Planning. In : TNO Insights [en ligne]. Disponible sur : <https://www.tno.nl/en/digital-twins-urban-planning/>

TULI, Munish, 2023. AI and the Potential to Create Digital Twins to Transform Military Logistics. In : CLAWS Journal [en ligne]. Disponible sur : https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/97181/ssoar-claws-2023-2-tuli-AI_and_the_Potential_to.pdf?sequence=1&isAllowed=y

VATTENFALL, 2024. Digital twins – a road to more profitable offshore wind. In : Vattenfall [en ligne]. Disponible sur : <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2024/digital-twins--a-road-to-more-profitable-offshore-wind>

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract	4
Introduction.....	5
1 Comprendre les jumeaux numériques	7
1.1 Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?.....	7
1.1.1 Origine et évolution du concept de jumeau numérique.....	7
1.1.2 Une appréciation erronée : jumeaux numériques vs simulations et modélisations traditionnelles.....	8
1.2 Les technologies sous-jacentes.....	9
1.2.1 Le rôle de l'Internet des objets (IoT) dans la collecte de données.....	9
1.2.2 L'intégration de l'intelligence artificielle et du machine learning pour l'analyse prédictive. 10	
1.2.3 Utilisation du cloud computing pour le stockage et le traitement des données.....	12
1.3 Les typologies des jumeaux numériques.....	12
1.4 Les niveaux de maturité et d'intégration des jumeaux numériques.....	13
1.4.1 Premier niveau : le modèle numérique.....	13
1.4.2 Deuxième niveau : l'ombre numérique.....	13
1.4.3 Troisième niveau : le jumeau numérique complet.....	14
2 Explorer les applications civiles des jumeaux numériques	15
2.1 L'industrie manufacturière	15
2.1.1 Optimisation des processus de production et maintenance prédictive.	15
2.1.2 Exemple : l'automatisation des usines intelligentes.....	15
2.2 Secteur de la santé	16
2.2.1 Modélisation de patients pour des traitements personnalisés.....	16
2.2.2 Exemple : DeepLife et l'innovation thérapeutique.....	17
2.3 Transports et logistique	17
2.3.1 Gestion optimisée des flottes et des infrastructures.....	17
2.3.2 Exemple : Les avionneurs et le jumeau numérique.....	17
2.4 Énergie, urbanisme et infrastructures critiques	18
2.4.1 Optimisation des réseaux énergétiques.....	18
2.4.2 Urbanisme et villes intelligentes.....	19
2.4.3 Infrastructures critiques.....	19
2.5 Quels enseignements tirer des avancées civiles pour les armées ?.....	19
2.5.1 Adapter les innovations industrielles aux besoins militaires.....	19
2.5.2 Identifier les limites et ajuster les solutions civiles au contexte militaire	20

3	Adapter les jumeaux numériques aux forces armées.....	23
3.1	Entraînement et simulation.....	23
3.2	Maintenance prédictive des équipements.....	24
3.3	Planification et conduite des opérations.....	26
3.4	Cybersécurité et défense des systèmes d'information.....	28
3.5	Conception des programmes futurs.....	29
3.6	Considérations budgétaires.....	31
3.7	Relever les défis et saisir les opportunités.....	33
3.8	Quelles recommandations pour maximiser les bénéfices ?	35
3.8.1	Investissements stratégiques et priorisation nécessaire	35
3.8.2	Développement de partenariats avec le secteur civil et international pour bénéficier des avancées technologiques et renforcer les synergies.	35
3.8.3	Standardisation des protocoles et des systèmes, gestion centralisée des données et des infrastructures.	35
3.8.4	Formation et adaptation du personnel	36
	Conclusion.....	37
	Bibliographie.....	38
	Ouvrage.....	38
	Rapports	38
	Articles de revues.....	39
	Sites web	40
4	Table des matières	45