

# Les Digital Twins comme source d'avantage concurrentiel durable: entre adoption technologique et capacité organisationnelle

Randa ABBAS

Académie d'Études Économiques de Bucarest, Roumanie

[abbasranda23@stud.ase.ro](mailto:abbasranda23@stud.ase.ro)

## Abstrait:

*La convergence entre l'intelligence artificielle, l'Internet des objets et le cloud computing reconfigure les bases compétitives des organisations et interroge des modèles stratégiques construits avant l'avènement du numérique. Les Digital Twins, représentations virtuelles dynamiques de processus ou d'actifs physiques, occupent une place croissante dans cette transformation, mais leur capacité réelle à produire un avantage concurrentiel durable reste peu explorée dans la littérature de management stratégique. Les travaux existants privilégient les dimensions techniques et laissent dans l'ombre la dimension organisationnelle ainsi que le rôle de l'intelligence artificielle, qui ne se contente pas d'amplifier le potentiel de ces systèmes mais en modifie qualitativement la nature. La présente étude examine dans quelles conditions les Digital Twins constituent une source d'avantage concurrentiel durable, en combinant une revue systématique de la littérature avec l'analyse des cas Siemens Electronics Works Amberg et GE Vernova, ancrée dans l'approche fondée sur les ressources et dans le cadre des capacités dynamiques.*

*L'apport empirique inclut une analyse comparative quantitative de l'évolution du marché par secteur sur la période 2020-2024 et un sondage propre conduit auprès d'un groupe de 22 participants. L'hypothèse centrale est que la plateforme, accessible à tout concurrent disposant du budget adéquat, ne produit pas en elle-même d'avantage durable: c'est la capacité de l'organisation à construire autour d'elle des connaissances tacites, des processus décisionnels propres et une culture des données qui détermine la robustesse de la position compétitive.*

*L'intégration de l'intelligence artificielle déplace les Digital Twins d'une logique de surveillance vers une logique d'anticipation autonome. L'étude montre que cet alignement organisationnel, plus que la technologie elle-même, constitue la véritable source de différenciation compétitive dans les écosystèmes d'affaires pilotés par les données.*

**Mots clés:** Digital Twins, avantage concurrentiel, capacités dynamiques, intelligence artificielle, écosystèmes d'affaires, stratégie numérique, Industrie 4.0.

## Introduction

La transformation numérique a produit une situation paradoxale: plus les entreprises investissent dans la technologie, plus il devient difficile d'identifier d'où provient, concrètement, l'avantage compétitif. Les plateformes se multiplient, les budgets informatiques augmentent et la pression pour adopter des solutions numériques est constante. Pourtant, la relation entre l'adoption d'une technologie et la performance stratégique réelle reste, dans la pratique, plus opaque que ne le suggère le discours d'investissement actuel.

Les Digital Twins se trouvent au cœur de ce débat. Le concept désigne une représentation virtuelle dynamique d'un objet ou d'un processus physique, alimentée en continu par des données provenant de capteurs IoT et de systèmes analytiques, dans le but de simuler, surveiller et optimiser le comportement de son équivalent matériel (Grieves, 2019) (IBM, 2025). Les résultats techniques sont réels et documentés: des usines qui ont multiplié leur production sans étendre leur surface, des réseaux énergétiques qui anticipent les pannes plusieurs jours à l'avance, des chaînes d'approvisionnement qui se reconfigurent de manière autonome face aux perturbations.

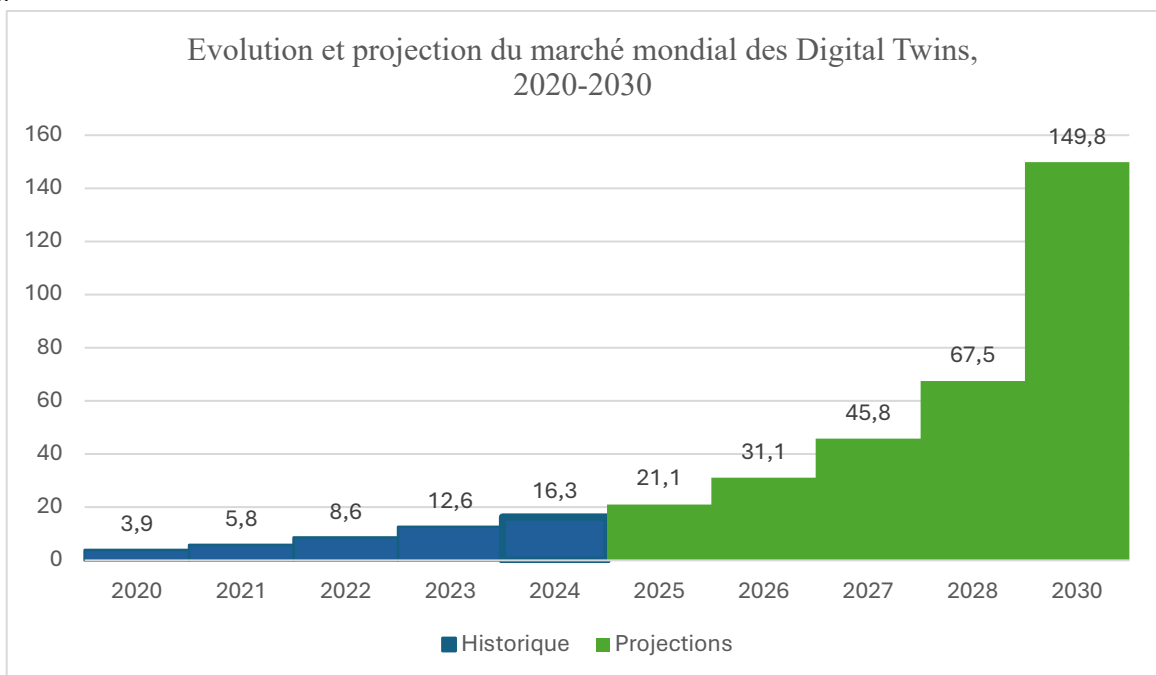
Le marché mondial des Digital Twins a atteint 16,3 milliards de dollars en 2024 et devrait dépasser 121 milliards d'ici 2034, avec un taux de croissance annuel composé de 22,3% (Emergen Research, 2024). La Figure 1 illustre cette trajectoire, tandis que le Tableau 2 retrace l'évolution du marché par secteur sur la période 2020-2024.

Les estimations varient selon les sources, ce qui reflète des différences liées aux horizons temporels et aux périmètres sectoriels. Emergen Research (2024) évalue le marché à 16,3 milliards USD en 2024 avec un CAGR de 22,3%, tandis que MarketsandMarkets (2025) projette 149,8 milliards USD en 2030 avec un CAGR (taux de croissance annuel composé) de 47,9%. Dans ce contexte, les valeurs retenues correspondent à des estimations médianes issues d'une triangulation des sources.

La question stratégique demeure ouverte: dans quelles conditions un Digital Twin devient-il une source d'avantage concurrentiel durable, et non une innovation que tout concurrent peut acquérir au même prix? La valeur stratégique ne réside pas dans la plateforme, accessible et standardisée, mais dans la façon dont l'organisation l'intègre, la calibre et construit autour d'elle des processus décisionnels difficiles à répliquer. Un instrument technique ne devient avantage compétitif que lorsqu'il se transforme en capacité organisationnelle.

Le rôle croissant de l'intelligence artificielle enrichit cette analyse. L'IA ne se superpose pas aux Digital Twins comme une couche additionnelle: elle transforme qualitativement ce que le système est capable de faire, en déplaçant sa fonction de la surveillance vers l'anticipation et, progressivement, vers la décision autonome. Cette évolution est insuffisamment documentée dans la littérature de management stratégique, notamment en ce qui concerne ses implications pour la compétitivité des organisations dans les écosystèmes d'affaires pilotés par les données.

L'ancrage théorique repose sur la théorie des capacités dynamiques (Teece, Pisano, & Shuen, Dynamic capabilities and strategic management, 1997) et sur l'approche fondée sur les ressources (Barney, 1991), complétées par l'analyse des cas Siemens Electronics Works Amberg et GE Vernova. La structure est la suivante: la deuxième section présente la revue de la littérature; la troisième expose la méthodologie; la quatrième discute les résultats; la cinquième conclut.



## Figure 1. Evolution et projection du marché mondial des Digital Twins, 2020-2030 (milliards USD)

Source: élaboration de l'auteur à partir des données d'Emergen Research (2024) et MarketsandMarkets (2025).

## Revue de la littérature

### *Architecture et typologie des Digital Twins*

Michael Grieves a introduit le concept de Digital Twin en 2003, dans le contexte de la gestion du cycle de vie des produits, mais l'idée est restée pendant de nombreuses années davantage une vision qu'une réalité opérationnelle. L'infrastructure nécessaire, notamment les capteurs peu coûteux, le cloud scalable et les algorithmes capables de traiter de grands volumes de données en temps réel, s'est maturée seulement au cours de la dernière décennie (Grieves, 2019).

Sur le plan architectural, un Digital Twin implique trois composantes interdépendantes: l'objet physique surveillé, le modèle virtuel qui le réplique et le flux bidirectionnel de données entre les deux (IBM, 2025); (Attaran, Attaran, & Celik, 2023). Tao et Zhang (2017) proposent un modèle pentadimensionnel qui ajoute une couche de services pour les fonctionnalités décisionnelles et une couche de données pour la gestion des volumes générés en temps réel. Les données accumulées et les modèles calibrés dans le temps deviennent des ressources que les concurrents ne peuvent pas acquérir rapidement, ce qui leur confère une pertinence stratégique au-delà de leur valeur opérationnelle immédiate.

La littérature distingue trois types principaux selon l'objet répliqué: les jumeaux de produit, axés sur la conception et le prototypage; les jumeaux de processus, centrés sur l'optimisation des flux opérationnels; et les jumeaux de système, qui reproduisent des réseaux entiers d'actifs interconnectés. Du point de vue stratégique, cette classification n'est pas neutre: les jumeaux de système impliquent un niveau d'intégration organisationnelle qui les rend nettement plus difficiles à copier, ce qui en fait la source d'avantage au potentiel de durabilité le plus élevé (McKinsey et Company, 2024a).

### *L'approche fondée sur les ressources et grille VRIO*

La théorie fondée sur les ressources, élaborée par Barney (1991) sur les bases posées par Penrose (1959), part d'un constat aux implications profondes: toutes les ressources d'une organisation ne sont pas également précieuses sur le plan stratégique. Celles qui génèrent un avantage durable doivent être simultanément valorisées, rares, inimitables et soutenues par l'organisation, selon la grille VRIO. Appliquée aux Digital Twins, cette grille produit un tableau plus nuancé que ne le suggère le discours d'investissement actuel. (Penrose, 1959)

La valeur ne peut être sérieusement contestée: réductions des temps d'arrêt, meilleure qualité, décisions plus rapides. La rareté, en revanche, est en déclin accéléré à mesure que les plateformes de Siemens, PTC, Microsoft Azure Digital Twins ou Ansys deviennent de plus en plus accessibles. La question stratégique réelle n'est donc pas « adoptons-nous des Digital Twins ? » mais « que construisons-nous autour d'eux qui soit difficile à imiter ? »

L'inimitabilité ne réside pas dans la plateforme, mais dans les connaissances tacites accumulées lors de la configuration et de la calibration du système, dans les processus organisationnels qui transforment ses sorties en décisions concrètes et dans la capacité d'interpréter les données dans le contexte propre de l'organisation. Ces ressources sont dépendantes du chemin parcouru: elles se construisent sur des années et ne s'acquièrent pas avec la licence logicielle. Le soutien organisationnel ajoute une deuxième source d'inimitabilité: la culture vis-à-vis des données et la qualité du portage exécutif déterminent quelle part du potentiel technique du système est effectivement exploitée. Le Tableau 1 synthétise cette analyse.

**Tableau 1. Analyse VRIO appliquée aux Digital Twins cas Siemens EWA et GE Vernova**

Ressource/ capacité	V	R	I	O	Implication stratégique
Plateforme DT (licence logicielle)	Oui	Non	Non	Non	Parité compétitive - disponible pour tous
Donnees operationnelles accumulees (ex. 50M points/jour Siemens EWA)	Oui	Oui	Oui	Oui	Avantage durable - dépendant du chemin parcouru
Connaissances tacites d'intégration et de calibration	Oui	Oui	Oui	Oui	Avantage durable - difficilement codifiable
Processus décisionnels construits sur les outputs DT	Oui	Oui	Oui	Oui	Avantage durable - organisationnel
Culture organisationnelle data-driven	Oui	Oui	Oui	Oui	Avantage durable - le plus difficile à imiter
Infrastructure IoT-Cloud-IA convergente	Oui	Partiel	Oui	Oui	Avantage temporaire - rareté en declin

Source: Contribution propre de l'auteur, basee sur Barney (1991), Siemens (2024) et GE Vernova (2024).

### ***Le cadre des capacités dynamiques***

L'approche fondée sur les ressources explique d'où vient l'avantage concurrentiel à un moment donné, mais n'explique pas pourquoi certaines organisations parviennent à le maintenir lorsque l'environnement compétitif évolue. C'est la question qu'aborde le cadre des capacités dynamiques (Teece, Pisano, & Shuen, Dynamic capabilities and strategic management, 1997) qui définit la capacité de l'organisation à intégrer, construire et reconfigurer ses compétences internes et externes en réponse aux changements de l'environnement. (Teece, Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance, 2007) opérationnalise ces capacités par la triade sensing, seizing et reconfiguring.

Les Digital Twins peuvent soutenir ces trois dimensions, mais pas automatiquement par le simple fait d'être déployés. Le sensing est soutenu par la surveillance continue et la simulation de scénarios; le seizing, par l'optimisation des décisions en temps réel; le reconfiguring, par la possibilité de tester virtuellement de nouvelles configurations opérationnelles avant leur mise en œuvre physique, réduisant ainsi le coût et le risque du changement. (Pitelis, Teece, & Yang, 2024) démontrent que l'adoption des technologies numériques constitue un vecteur essentiel des capacités dynamiques dans les écosystèmes contemporains, à condition d'une intégration organisationnelle réelle. (Kero & Bogale, 2023) confirment que la synthèse entre les deux cadres théoriques offre l'outil analytique le plus robuste pour évaluer la valeur stratégique des technologies numériques émergentes.

### ***Le rôle de l'intelligence artificielle dans l'amplification de l'avantage compétitif***

L'intelligence artificielle modifie qualitativement la nature du potentiel stratégique des Digital Twins. Un Digital Twin sans composantes avancées d'IA fonctionne comme un instrument de surveillance et de simulation: il est utile, mais réactif. L'intégration d'algorithmes de machine learning transforme le système d'un outil de reflet passif en un agent d'anticipation actif

(Springer Nature, 2025): le système détecte les anomalies sans être interrogé, propose des optimisations et, dans les implémentations les plus avancées, initie des actions correctives sans intervention humaine.

(McKinsey et Company, 2024b) documente un effet combinatoire: l'IA générative structure les entrées et synthétise les sorties des Digital Twins, tandis que les Digital Twins offrent l'environnement de test rigoureux et l'ancrage dans la réalité physique qui manquait à de nombreuses implémentations d'IA. Selon ces mêmes travaux, 75% des grandes entreprises investissent activement dans les Digital Twins comme infrastructure de mise à l'échelle des solutions d'IA (McKinsey et Company, 2024). Le rapport McKinsey sur l'optimisation des usines confirme que les Digital Twins de système, intégrant IoT, cloud et IA, réduisent les temps d'arrêt non planifiés de 15 à 25% dans les environnements manufacturiers matures, ce qui constitue un indicateur empirique supplémentaire de la valeur stratégique de cette convergence technologique. Les Digital Twins sont ainsi le mécanisme par lequel l'IA devient opérationnelle dans un écosystème industriel, transformant une capacité d'analyse générique en avantage compétitif ancré dans les données et les processus propres de l'organisation. Le Forum économique mondial confirme ce rôle: selon le (World Economic Forum, 2024), les Digital Twins permettent aux entreprises au sein des clusters industriels de dépasser les silos de données et d'optimiser les écosystèmes de production de manière collective, renforçant leur pertinence stratégique au-delà du périmètre de l'entreprise individuelle.

### ***Les Digital Twins dans les écosystèmes d'affaires pilotés par l'IA***

(Moore, 1993) a introduit le concept d'écosystème d'affaires pour décrire les réseaux d'organisations interdépendantes qui co-évoluent sur la base de plateformes et de standards communs. Dans les écosystèmes pilotés par l'IA, les données sont devenues la ressource stratégique centrale, et la vitesse à laquelle elles sont générées, interprétées et transformées en décision détermine le positionnement compétitif.

Les Digital Twins fonctionnent, dans ce contexte, comme un nœud de médiation entre le monde physique des opérations et le monde numérique de l'analyse stratégique. (Jacobides & Reeves, 2023) montrent que la numérisation de l'écosystème permet aux organisations de simuler l'impact des perturbations externes, crises d'approvisionnement, entrée de nouveaux concurrents, changements réglementaires, sans risques opérationnels réels. Cette capacité d'anticipation au niveau de l'écosystème transforme les Digital Twins d'un outil d'efficacité interne en un instrument de positionnement stratégique.

## **Méthodologie**

La présente recherche adopte une approche mixte combinant une revue systématique de la littérature, l'analyse de cas d'implémentation matures, une analyse quantitative comparative de l'évolution du marché par secteur sur la période 2020-2024 et un sondage propre conduit auprès de 22 participants en 2026. Ce choix répond à la nature de la question de recherche: comprendre les conditions dans lesquelles une technologie génère un avantage concurrentiel requiert une exploration conceptuelle et un ancrage empirique dans les perceptions des acteurs.

La revue de la littérature a couvert des publications issues de Scopus, Web of Science et Google Scholar pour la période 2017-2025, avec les termes: "digital twins", "competitive advantage", "dynamic capabilities", "IoT ecosystems", "strategic fit", "manufacturing", "energy sector", "artificial intelligence". Quarante travaux ont été sélectionnés, filtrés selon des critères d'actualité, d'impact académique et de pertinence directe. Le corpus comprend des articles issus de Strategic Management Journal, Journal of Management Studies, California Management

Review et Energy Informatics, complétés par des publications du Forum économique mondial, des rapports de McKinsey et Deloitte utilisés comme sources de données agrégées et non comme autorités théoriques, et des documentations techniques officielles des entreprises analysées.

L'analyse quantitative du Tableau 2 a été construite par triangulation de trois sources publiques vérifiables: (Emergen Research, 2024), (Global Market Insights, 2024) et (BIS Research via Statista, 2020). Lorsque les estimations divergeaient entre sources, la valeur médiane a été retenue. Il convient de souligner que les données de marché issues de sources commerciales constituent des estimations dont la méthodologie varie selon le périmètre sectoriel retenu; les valeurs présentées sont donc des estimations centrales et non des mesures directes.

Le sondage propre a été conduit par formulaire numérique anonyme auprès de 22 participants composés d'étudiants en management (FABIZ, ASE Bucarest) et de jeunes professionnels issus de secteurs variés (conseil et management, industrie, IT, énergie). Il comportait 10 questions portant sur la familiarité avec le concept de Digital Twin, les perceptions de l'avantage concurrentiel, les sources d'inimitabilité, les barrières à l'adoption, le rôle de l'IA et la résilience organisationnelle. Ce sondage constitue l'apport de données primaires de la présente étude.

L'analyse des cas s'est concentrée sur l'usine Electronics Works Amberg de Siemens et sur GE Vernova et Siemens Gamesa. Les critères de sélection: représentativité sectorielle, disponibilité de données vérifiables dans des sources primaires et diversité des contextes d'implémentation. La recherche teste trois hypothèses: (H1) l'adoption des Digital Twins améliore l'efficacité opérationnelle et la qualité des décisions; (H2) la valeur stratégique est conditionnée par l'alignement avec les priorités de l'organisation; (H3) l'intégration convergente de l'IoT, du cloud computing et de l'IA amplifie le potentiel stratégique des Digital Twins.

## Résultats et discussions

### *Évolution du marché des Digital Twins par secteur: analyse comparative 2020-2024*

Le Tableau 2 retrace l'évolution du marché mondial des Digital Twins par secteur sur la période 2020-2024.

**Tableau 2. Evolution du marche mondial des Digital Twins par secteur, 2020-2024 (milliards USD)**

Secteur	2020	2021	2022	2023	2024	CAGR (%)
Manufacturier	1,4	2,0	2,9	4,1	5,7	38,2%
Automobile & Transport	0,8	1,2	1,8	2,6	3,3	40,5%
Aérospatiale & Défense	0,6	0,9	1,3	1,8	2,0	33,2%
Énergie & Services publics	0,4	0,6	0,9	1,4	2,4	56,5%
Santé	0,2	0,3	0,5	0,8	1,6	68,2%
Autres (villes intelligentes, logistique, etc.)	0,5	0,8	1,2	1,9	3,3	59,8%
<b>TOTAL MARCÉ MONDIAL</b>	<b>3,9</b>	<b>5,8</b>	<b>8,6</b>	<b>12,6</b>	<b>16,3</b>	<b>41,2%</b>

Contribution propre de l'auteur, basée sur Emergen Research (2024), Global Market Insights (2024) et BIS Research via Statista (2020).

Le secteur manufacturier reste le plus grand marché en valeur absolue, avec 5,7 milliards de dollars en 2024, soit 35 % du marché mondial (Emergen Research, 2024). Cette position reflète une maturité technologique avancée: les Digital Twins y sont intégrés dans les lignes de production depuis plus d'une décennie, ce qui se traduit par un CAGR (taux de croissance annuel composé) plus modéré de 38 % par rapport aux secteurs émergents. Le secteur de la santé

enregistre la croissance la plus rapide, avec un CAGR de 68 %, partant d'une base de 0,2 milliard en 2020 pour atteindre 1,6 milliard en 2024, sous l'impulsion des applications de médecine de précision (Technavio, 2024). Le secteur de l'énergie présente une croissance de 56,5 %, portée par la transition énergétique.

Les valeurs du Tableau 2 représentent des estimations en milliards USD issues de la triangulation d'Emergen Research (2024), Global Market Insights (2024) et BIS Research via Statista (2020); lorsque les estimations divergeaient entre sources, la valeur médiane a été retenue.

Ces données ont une implication directe pour l'argument central de l'étude. Dans les secteurs à maturité élevée, la rareté de la plateforme comme source d'avantage a pratiquement disparu. Ce qui subsiste comme source d'inimitabilité, ce sont les données accumulées, les connaissances tacites d'intégration et la culture organisationnelle vis-à-vis des données. Dans les secteurs à adoption plus récente, la rareté reste présente mais s'accompagne de barrières d'implémentation élevées.

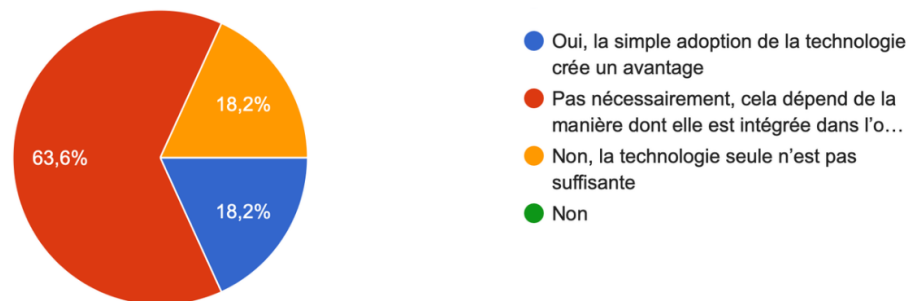
### ***Perceptions stratégiques des Digital Twins: résultats du sondage propre (n = 22)***

En complément de l'analyse quantitative de marché, un sondage propre a été conduit auprès de 22 participants en 2026: principalement des étudiants en licence et master en management (FABIZ, ASE Bucarest), des entrepreneurs et consultants, et des étudiants-employés, issus du conseil et management (10), de l'industrie manufacturière (4), de l'IT (3), de l'énergie (1) et d'autres secteurs (4). Les Figures 2, 3 et 4 présentent les résultats les plus significatifs (Sondage propre de l'auteur, 2026).

***Figure 2. Perceptions de l'avantage compétitif des Digital Twins***

Pensez-vous qu'une entreprise qui adopte un Digital Twin obtient automatiquement un avantage concurrentiel par rapport à ses concurrents?

22 de răspunsuri



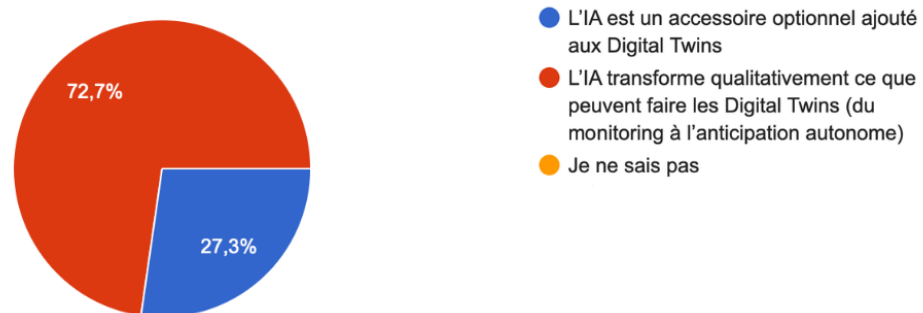
Source: Sondage propre de l'auteur, 2026 (n= 22).

***Figure 3. Rôle perçu de l'intelligence artificielle par rapport aux Digital Twins***

Comment décrivez-vous le rôle de l'intelligence artificielle par rapport aux Digital Twins?

 Copiază graficul

22 de răspunsuri

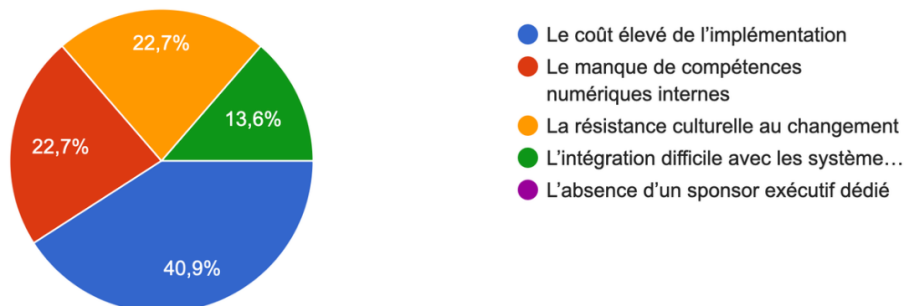


Source: Sondage propre de l'auteur, 2026 (n= 22).

#### *Figure 4. Principales barrières à l'adoption des Digital Twins en Roumanie*

Quelle est, selon vous, la principale barrière à l'adoption des Digital Twins dans les entreprises en Roumanie?

22 de răspunsuri



Source: Sondage propre de l'auteur, 2026 (n= 22).

Les données du sondage confirment plusieurs hypothèses de cette étude. À la question sur la source d'avantage compétitif (Figure 2), 82% des répondants estiment que la simple adoption d'un Digital Twin ne suffit pas, ce qui corrobore l'hypothèse centrale. Paradoxalement, 55% identifient la plateforme technologique comme principale source d'avantage, avant les données accumulées (27%) et les connaissances internes de configuration (9 %). Ce décalage illustre précisément la tension que la grille VRIO permet de résoudre : la valeur est perçue au niveau de la plateforme, mais l'inimitabilité réside dans les ressources organisationnelles construites autour d'elle.

Concernant le rôle de l'IA (Figure 3), 77% des répondants estiment qu'elle transforme qualitativement ce que le Digital Twin peut accomplir. Ce résultat est d'autant plus significatif que

41% des participants n’avaient qu’une connaissance partielle ou nulle du concept avant le sondage, ce qui indique que la distinction qualitative entre un Digital Twin avec ou sans IA est perçue intuitivement, indépendamment du niveau d’expertise technique. Les barrières à l’adoption en Roumanie (Figure 4) reflètent les conclusions de (Deloitte, 2025): le coût élevé domine (41%), suivi du manque de compétences numériques internes et de la résistance culturelle au changement (23% chacun), confirmant que les obstacles sont davantage organisationnels que technologiques.

**Le cas Siemens Electronics Works Amberg**

L’usine Electronics Works Amberg de Siemens en Allemagne représente l’un des exemples les mieux documentés de déploiement mature des Digital Twins à l’échelle industrielle. Fondée en 1989 et spécialisée dans la production de contrôleurs programmables Simatic, l’usine a multiplié son volume de production par 13 depuis 1990, fabriquant aujourd’hui environ 17 millions de produits par an, soit approximativement un produit par seconde, avec 1 200 variantes de produit et 350 changements de configuration quotidiens, sans modifier sa surface de production de 10 000 mètres carrés ni ses effectifs (Siemens, 2024); NavVis, 2025).

Le Digital Twin de l’usine réplique en temps réel les flux de production, l’état de chaque machine et les paramètres de qualité, permettant la planification et le test de toute reconfiguration de ligne dans l’environnement virtuel avant toute intervention physique. L’intégration de l’Edge Computing et de l’IA a permis la détection des anomalies 12 à 36 heures avant l’apparition d’un incident potentiel (Siemens, 2024). Le système traite 50 millions de points de données quotidiennement et maintient un taux de qualité de 99,999 %.

Ce qui compte stratégiquement dans ce cas est que le Digital Twin n’a pas optimisé un processus isolé: il a reconfiguré la logique opérationnelle de l’ensemble de l’organisation, transformant la capacité de production sans ajouter de ressources physiques. (McKinsey et Company, 2024a) estime que les Digital Twins déployés dans les chaînes d’approvisionnement génèrent typiquement jusqu’à 20% d’amélioration dans le respect des engagements et jusqu’à 10% de réduction des coûts dans des conditions favorables. Le Tableau 3 synthétise les principaux indicateurs vérifiés. L’hypothèse H1 est validée.

**Tableau 3. Indicateurs de performance opérationnelle vérifiés Siemens EWA et GE Vernova**

<b>Indicateur</b>	<b>Valeur vérifiée</b>	<b>Source primaire</b>
Croissance volume production EWA (1990-2024)	13x (même surface, même effectifs)	Siemens (2024) ; NavVis (2025)
Taux de qualite EWA	99,999%	Siemens (2024)
Détection des anomalies en avance - EWA	12 à 36 heures	Siemens (2024)
Points de données traités quotidiennement - EWA	50 millions	Siemens (2024)
Total EP - défaillances inattendues (depuis 2013)	Zéro	GE Vernova (2024b)
STEG - puissance récupérée via APM	4 MW	GE Vernova (2024a)
GE Vernova IMS - economies cumulees clients	Plus de 1,6 milliard USD	GE Vernova (2024a)

Amélioration supply chain (benchmark)	Jusqu'à 20% (conditions optimales)	McKinsey (2024a)
---------------------------------------	------------------------------------	------------------

Source: Contribution propre de l'auteur, sur la base des données vérifiées des sources indiquées.

### ***Pourquoi l'alignement stratégique compte davantage que la plateforme***

Les données du cas Siemens EWA pourraient laisser croire que tout déploiement mature produit des résultats similaires. L'analyse comparative de la littérature montre qu'il n'en est rien. (Deloitte, 2025) identifie l'alignement stratégique comme le principal facteur différenciant les implémentations à ROI élevé de celles qui restent au stade de projets pilotes. La plateforme choisie importe moins que la façon dont l'initiative a été ancrée dans l'agenda stratégique et dans les processus décisionnels de l'organisation.

(Kumar, Raut, Narkhede, & Gardas, 2024) examinent explicitement l'adéquation stratégique comme variable modératrice dans la relation entre l'adoption des Digital Twins et la résilience des chaînes d'approvisionnement. L'alignement amplifie significativement les bénéfices, et son absence les réduit presque à zéro. Les entreprises qui adoptent les Digital Twins en réponse aux pressions d'imitation, sans ancrage dans leurs priorités stratégiques propres, obtiennent des bénéfices nettement inférieurs.

Traduit en termes de grille VRIO, les sources réelles d'inimitabilité sont les connaissances tacites accumulées lors de la configuration du système, les processus organisationnels qui transforment ses sorties en décisions concrètes et la culture vis-à-vis des données, trois éléments dépendants du chemin parcouru, construits sur des années. L'avantage concurrentiel des Digital Twins est, dans son essence, plus organisationnel que technologique. Ce constat est corroboré par les résultats du sondage: 82% des répondants reconnaissent que l'intégration organisationnelle prime sur la technologie elle-même. L'hypothèse H2 est validée.

### ***Le secteur énergétique et la convergence IoT-Cloud-IA***

Les réseaux d'énergie renouvelable constituent un environnement opérationnel exigeant: production intermittente, dispersion géographique des actifs, complexité systémique élevée et pression constante pour l'efficacité. Comme le montre le Tableau 2, le secteur enregistre un CAGR (taux de croissance annuel composé) de 56,5% sur 2020-2024, signe que les organisations pionnières bénéficient encore d'un avantage de rareté significatif.

GE Vernova utilise des Digital Twins des actifs critiques alimentés par des données de capteurs en temps réel. Le système SmartSignal surveille plus de 7 000 actifs critiques dans le monde et l'équipe Industrial Managed Services a généré des économies cumulées de plus de 1,6 milliard de dollars. Total EP utilise SmartSignal pour opérer le centre de surveillance RAID, qui monitore 30 000 capteurs sur 260 arbres et 540 équipements, aboutissant à zéro défaillance inattendue depuis 2013 (GE Vernova, 2024b). La STEG a récupéré 4 MW (mégawatts) de puissance perdue grâce à APM (Asset Performance Management) Performance Intelligence (GE Vernova, 2024a). Siemens Gamesa combine les modèles physiques avec les simulations numériques pour optimiser les performances de chaque éolienne (Siemens Gamesa, 2023).

La relation d'interdépendance entre les trois couches technologiques fonctionne de la façon suivante: sans IoT, les données de qualité nécessaires n'existent pas; sans cloud, l'infrastructure

de traitement à grande échelle est absente; sans IA, la capacité d'extraire des prédictions utiles des volumes générés fait défaut. Ensemble, ces technologies produisent un système aux capacités qualitativement différentes. Les recherches publiées dans (Springer Energy Informatics, 2024) confirment que les architectures IoT bidirectionnelles sont essentielles pour exploiter pleinement cette synergie. Ce constat est reflété dans le sondage: 91% des répondants estiment que la convergence IoT-Cloud-IA est au minimum importante. L'hypothèse H3 est validée.

### ***Les causes de l'échec des implémentations***

Les cas de sous-performance méritent d'être examinés au même titre que les succès. Deloitte (2024) identifie comme principale cause l'absence d'un porteur exécutif capable d'ancrer l'initiative dans l'agenda de l'organisation. Sans ce soutien, les Digital Twins restent des outils de surveillance opérationnelle, utiles mais dépourvus d'impact stratégique. L'intégration avec les systèmes informatiques existants constitue un deuxième obstacle: le middleware personnalisé nécessaire peut majorer substantiellement les coûts (Grieves, 2019). Les risques de cybersécurité s'ajoutent à ces obstacles, particulièrement dans le secteur énergétique (Attaran, Attaran, & Celik, 2023). Le sondage confirme ces tendances: le coût élevé est cité par 41% des répondants, tandis que le manque de compétences et la résistance culturelle totalisent chacun 23%. Ces barrières confirment que le déploiement d'un Digital Twin est un projet organisationnel autant qu'un projet technologique.

### **Conclusions**

Les cas examinés et les données sectorielles confirment que les Digital Twins, déployés dans des conditions d'intégration organisationnelle sérieuse, produisent des gains de performance substantiels. Siemens EWA a multiplié par 13 son volume de production en trente-cinq ans sans modifier sa surface industrielle ni ses effectifs, en maintenant un taux de qualité de 99,999% et en détectant les anomalies 12 à 36 heures à l'avance. GE Vernova a aidé Total EP à atteindre zéro défaillance inattendue depuis 2013 et a généré plus de 1,6 milliard de dollars d'économies cumulées. À l'échelle sectorielle, le marché a quadruplé en quatre ans, de 3,9 à 16,3 milliards entre 2020 et 2024, avec une hétérogénéité marquée selon les secteurs qui confirme que la maturité de la technologie et la nature de l'avantage qu'elle procure varient considérablement. L'hypothèse H1 est validée.

Les données de marché et les résultats du sondage pointent vers la même conclusion. Dans les secteurs où l'adoption est avancée, la rareté de la plateforme comme source d'avantage a disparu. Ce qui demeure difficile à répliquer, ce sont les données accumulées, les connaissances tacites d'intégration et la culture organisationnelle vis-à-vis des données. L'adéquation stratégique émerge comme variable modératrice essentielle, validant l'hypothèse H2. Le paradoxe identifié dans le sondage, 82% reconnaissant que l'intégration prime sur la technologie mais 55% citant la plateforme comme principale source d'avantage, illustre précisément la tension que la grille VRIO permet de résoudre. Choisir la bonne plateforme est une condition nécessaire, mais loin d'être suffisante : sans portage exécutif réel et sans développement parallèle des compétences internes d'interprétation des données, l'avantage attendu ne se matérialise pas durablement.

L'intelligence artificielle change qualitativement ce que les Digital Twins sont capables de faire, et pas seulement dans quelle mesure ils le font. Sans IA, un Digital Twin documente et simule, mais reste tributaire des questions que l'on choisit de lui poser. Avec l'IA intégrée, le système détecte des signaux que personne n'avait cherchés, identifie des configurations que personne n'avait envisagées et, dans les implémentations les plus avancées, agit sans attendre d'instruction. Que 77% des participants au sondage aient reconnu cette différence intuitivement, sans formation préalable au sujet, indique que la perception de ce déplacement qualitatif dépasse le cercle des spécialistes. L'hypothèse H3 est validée, et la relation entre IA et Digital Twins représente une direction de recherche dont le potentiel pour le management stratégique reste encore largement inexploré.

Les limites de cette recherche délimitent le périmètre de validité des conclusions. Les données de marché proviennent de sources commerciales, ce qui implique que les valeurs du Tableau 2 sont des estimations centrales issues d'une triangulation et non des mesures directes. Le sondage, bien qu'il apporte un élément de données primaires, reste modeste en taille (n=22) et représente un échantillon relativement homogène. Deux secteurs et trois entreprises ne permettent pas de généralisation à l'échelle mondiale. Des recherches futures pourraient dépasser ces contraintes par des études panel longitudinales à l'échelle sectorielle et par le développement d'instruments de mesure de l'adéquation stratégique dans le contexte de l'adoption des Digital Twins.

## Références

- Grieves, M. (2019). Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins. In S. Flumerfelt (Ed.), *Complex Systems Engineering: Theory and Practice* (pp. 175-200). Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- IBM. (2025). *What is a digital twin?* Retrieved 2026, from <https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin>
- Emergen Research. (2024). *Digital twin market*. Retrieved 2026, from <https://www.emergenresearch.com/industry-report/digital-twin-market>
- Teece, D., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18, 509-533.
- Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99-120.
- Attaran, M., Attaran, S., & Celik, B. (2023). The impact of digital twins on the evolution of intelligent manufacturing and Industry 4.0. *Advances in Computational Intelligence*, 3(11).
- Penrose, E. (1959). *The theory of the growth of the firm*. Oxford : Blackwell.

- Teece, D. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance . *Strategic Management Journal* , 28(13), 1319-1359.
- Pitelis, C., Teece, D., & Yang, H. (2024). Dynamic capabilities and MNE global strategy: A systematic literature review-based novel conceptual framework . *Journal of Management Studies*, 61(7), 2973-3022.
- Kero, C., & Bogale, A. (2023). A systematic review of resource-based view and dynamic capabilities of firms and future research avenues . *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(10).
- Springer Nature. (2025). From simulation to autonomy: Reviews of the integration of artificial intelligence and digital twins . *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology* .
- McKinsey et Company. (2024b). *Digital twins and generative AI: A powerful pairing*. Retrieved from <https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/tech-forward/digital-twins-and-generative-ai-a-powerful-pairing>
- McKinsey et Company. (2024a). *Digital twins: The key to unlocking end-to-end supply chain growth*. Retrieved 2026, from <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/digital-twins-the-key-to-unlocking-end-to-end-supply-chain-growth>
- McKinsey et Company. (2024). *What is digital twin technology?* Retrieved 2026, from <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-digital-twin-technology>
- World Economic Forum . (2024). *Digital twins and industrial clusters: Optimizing ecosystems for energy efficiency*. Retrieved 2026, from <https://www.weforum.org/stories/2024/06/digital-twins-and-industrial-clusters-are-about-to-change-the-face-of-manufacturing/>
- Moore, J. (1993). Predators and prey: A new ecology of competition. *Harvard Business Review*, 71(3), 75-86.
- Jacobides, M., & Reeves, M. (2023). Externalities and the scope of the firm. *California Management Review*, 65(3), 30-52.
- Global Market Insights. (2024). *Digital twin market size, share and growth analysis 2025-2034* . Retrieved 2026, from <https://www.gminsights.com/industry-analysis/digital-twin-market>
- BIS Research via Statista. (2020). *Digital twin market size by industry sector*. Retrieved 2026, from <https://www.statista.com/statistics/1212032/digital-twin-market-size-worldwide/>

- Technavio. (2024). *Digital Twin Market Analysis North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, South America - US, Germany, UK, Japan, Canada - Size and Forecast 2025-2029*. Retrieved 2026
- Deloitte. (2025). *From manufacturing to medicine: How digital twins can unlock new industry advantages*. Retrieved 2026, from <https://www.deloitte.com/us/en/insights/topics/business-strategy-growth/digital-twin-strategy.html>
- Siemens. (2024). *Electronics Works Amberg: Digital Enterprise in practice*. Retrieved 2026, from <https://www.siemens.com/global/en/company/stories/industry/electronics-digitalenterprise-futuretechnologies.html>
- Kumar, S., Raut, R., Narkhede, B., & Gardas, B. (2024). From theory to practice: Leveraging digital twin technologies and supply chain disruption mitigation strategies for enhanced supply chain resilience with strategic fit in focus. *Global Journal of Flexible Systems Management* .
- GE Vernova. (2024b). *Total EP counts on zero unanticipated failures with SmartSignal-powered monitoring center* . Retrieved from <https://www.governova.com/software/customer-stories/total-ep-reach-zero-unanticipated-failures>
- GE Vernova. (2024a). *Digital twin technology*. Retrieved from <https://www.governova.com/software/innovation/digital-twin-technology>
- Siemens Gamesa. (2023). *Digital solutions for wind turbines*. Retrieved 2026, from <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/service-and-maintenance/digital-solutions>
- Springer Energy Informatics. (2024). Digital twins of smart energy systems: A systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges . *Energy Informatics*.