LinkTec Labs · Publications

Jumeaux numériques, modèles du monde, IA physique

Notice de lecture · V1 · 15 octobre 2026

Nature et portée : synthèse de sources et proposition d’architecture de référence. Ce document n’est ni une publication évaluée par les pairs, ni un compte rendu d’expérience LinkTec, ni une référence client.

Rectification de portée : les mentions du manuscrit « déploie », « construit », « auditable », « souverain » ou équivalentes décrivent ici des objectifs d’architecture à vérifier par projet ; elles n’attestent aucun déploiement client, équipement exploité, certification ou résultat LinkTec. Les hypothèses ne constituent pas un programme de recherche réalisé ni une promesse de publication.

Les résultats chiffrés cités restent ceux de leurs auteurs, dans leurs protocoles. Les formulations générales, recommandations et seuils ne sont pas des garanties applicables à toute charge de travail. La revue de lecture et des références principales n’est pas une réplication des expériences ni une validation scientifique exhaustive.

Déploiement chez le client ou sur un cloud choisi avec lui. Origine, taille et ouverture d’un modèle ne déterminent ni son lieu d’exécution ni ses droits commerciaux. Versions, licences, accès et dépendances doivent être vérifiés. Aucune API américaine de modèle sans demande du client.

Précisions : jumeau numérique, modèle du monde appris et contrôle d’un système physique sont des objets distincts. Les systèmes NASA, Genie, Cosmos et V-JEPA décrivent les recherches ou produits de leurs auteurs, pas des capacités déjà exécutées par LinkTec. Une simulation ne garantit pas la validité d’un transfert au réel ; hypothèses, données, validation et supervision restent nécessaires. Le temps réel demeure expérimental chez LinkTec. Aucun robot, flotte, datacenter propre ou fourniture matérielle n’est annoncé. Les tailles de marché et projections insuffisamment sourcées ne sont pas retenues comme faits vérifiés.

linktec.fr/recherche · Cette notice précise la portée du manuscrit qui suit.



NOTE DE RECHERCHE N°05 · IA & DONNÉES APPLIQUÉES

Jumeaux numériques, modèles du monde, **IA physique**

Des répliques aux simulateurs appris, et la discipline de décider avant d'agir.

RÉSUMÉ

Un jumeau numérique a commencé comme une réplique synchronisée d'un actif physique, quelque chose à observer. La frontière s'est déplacée : un *modèle du monde* est un simulateur appris et génératif d'un environnement, quelque chose qu'on déroule vers l'avant pour prédire, planifier et entraîner des agents « en imagination » avant de toucher au réel. NVIDIA formule la destination sans détour : l'IA physique doit d'abord être entraînée numériquement, sur un jumeau numérique d'elle-même et un jumeau numérique du monde. Cette note retrace l'échelle qui mène du jumeau d'actif au jumeau de processus, puis au modèle du monde, puis à l'IA physique, explique ce qu'est réellement un modèle du monde, et montre pourquoi la simulation devient l'instrument par lequel robots, flottes et même processus métier sont décidés avant d'être déployés. Nous terminons par l'architecture « simuler pour décider » que LinkTec Labs applique, et par le fil qui relie toute la série 2026 : modéliser le monde, simuler, mesurer, puis agir.

01 · DE LA RÉPLIQUE AU SIMULATEUR

La redéfinition silencieuse du jumeau numérique

Pendant vingt ans, un jumeau numérique désignait une réplique fidèle, synchronisée par les données, d'un objet physique, un réacteur, une turbine, une ligne d'usine, tenue au pas de son homologue réel pour que les ingénieurs puissent le surveiller et revenir sur ce qui s'était passé. Cette définition est désormais trop étroite. Le jumeau d'actif qu'on observe devient un *modèle du monde* qu'on interroge : un simulateur appris et génératif qu'on déroule *vers l'avant* pour demander ce qui se passerait ensuite, sous une action qu'on n'a pas encore prise.

La destination est formulée le plus clairement par ceux qui en construisent l'infrastructure. La plateforme Cosmos de NVIDIA s'ouvre sur une thèse qui tient lieu de définition du domaine : *l'IA physique doit d'abord être entraînée numériquement ; elle a besoin d'un jumeau numérique d'elle-même, le modèle de politique, et d'un jumeau numérique du monde, le modèle du monde*[5]. Autrement dit, avant qu'un robot n'agisse dans le monde, il devrait répéter dans un monde simulé. La réplique devient un espace de répétition.

Ce n'est pas une préoccupation de niche, et il ne s'agit pas seulement de robots. Le marché du jumeau numérique, de l'ordre de quarante à cinquante milliards de dollars en 2026 et croissant à plus de 30 % par an vers plusieurs centaines de milliards au début des années 2030, est tiré exactement par cette bascule, les jumeaux de processus et de simulation en étant les segments les plus dynamiques[9]. La thèse de cette note en découle :

> Un jumeau numérique n'est plus quelque chose qu'on regarde. C'est quelque chose qu'on interroge. La valeur n'est pas la réplique ; c'est la capacité de simuler une décision, et de la mesurer, avant d'agir.

Pour une organisation, labo de robotique ou PME, ce recadrage est tout l'enjeu, et c'est la discipline vers laquelle cette série a convergé.

TERMES CLÉS

Un vocabulaire commun pour la suite. Les spécialistes peuvent passer.

Jumeau numérique	Réplique virtuelle d'un actif ou processus physique, tenue synchronisée par des données en temps réel.
Jumeau d'organisation (DTO)	Jumeau des processus, supply chains et workflows d'une entreprise, pas seulement d'un actif (Gartner : DTO).
Modèle du monde	Modèle appris et génératif de la dynamique d'un environnement, capable de prédire des états futurs et d'y agir.

IA physique	IA qui perçoit et agit dans le monde physique : robots, véhicules autonomes, systèmes industriels.
Sim-to-real	Entraîner ou planifier en simulation, puis transférer le comportement appris au monde réel.
Données synthétiques	Données générées en simulation pour entraîner là où le réel est rare, coûteux ou dangereux.
JEPA	Architecture prédictive à embeddings joints : un modèle du monde qui prédit dans un espace latent, pas en pixels.
Contrôle prédictif (MPC)	Planifier les actions en simulant leurs effets avec un modèle et en choisissant la meilleure, pas à pas.
Entraînement « en imagination »	Laisser un agent apprendre dans un monde généré/simulé plutôt que dans le réel, coûteux.
Écart sim-to-real	La différence de fidélité entre simulation et réalité qui limite le transfert naïf.

02 · L'ÉCHELLE

Jumeau d'actif, de processus, modèle du monde, IA physique

Le domaine se lit comme une échelle de capacité croissante, des systèmes qui *observent* aux systèmes qui *agissent*. Tout en bas, le **jumeau d'actif** classique : réplique alimentée par capteurs d'une seule machine, pour la surveillance et la maintenance prédictive. Au-dessus, le **jumeau de processus ou d'organisation**, ce que Gartner appelle un Digital Twin of an Organization, modélise des workflows, supply chains et parcours client entiers, pour que les planificateurs simulent un changement avant de s'y engager[9]. Plus haut, le **modèle du monde** généralise d'une réplique précise vers un simulateur appris de la dynamique, capable de prédire des états qu'on ne lui a jamais explicitement montrés. Tout en haut, l'**IA physique** boucle : un agent qui a répété dans le modèle du monde agit désormais dans le réel[5].

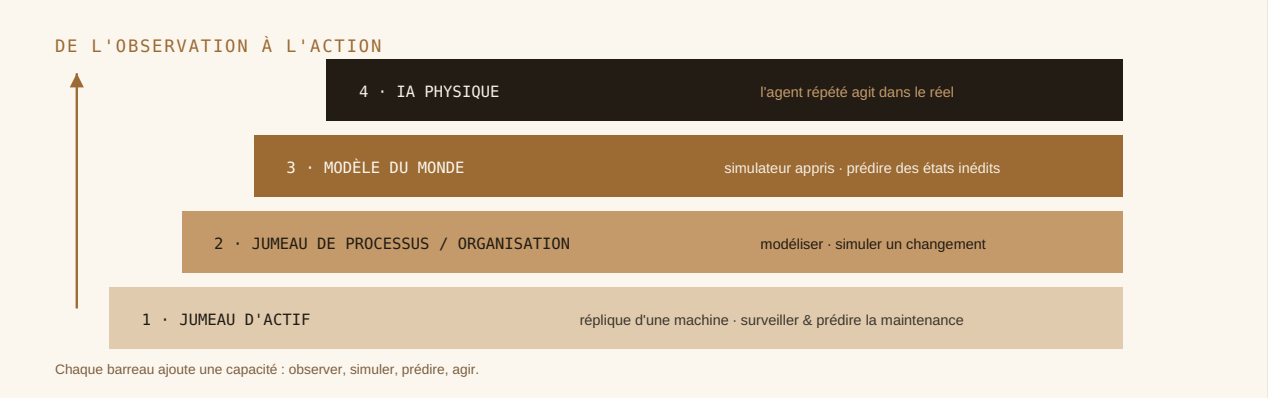


Fig. 1 · L'échelle de maturité. Le jumeau d'actif observe ; le jumeau de processus simule un changement ; le modèle du monde prédit des états inédits ; l'IA physique agit sur ce qu'elle a répété[5][9].

03 · CE QU'EST RÉELLEMENT UN MODÈLE DU MONDE

Un simulateur appris dans lequel on peut agir

Un modèle du monde est, au fond, un modèle de la *dynamique* : étant donné l'état courant et une action candidate, il prédit l'état suivant. Cette seule capacité débloque le reste, car un agent capable de prédire les résultats peut *planifier* en essayant des actions dans sa tête, et peut être entraîné « en imagination » à l'intérieur du modèle plutôt que dans le monde réel, coûteux, lent, parfois dangereux. La filiation est claire. Ha et Schmidhuber ont montré qu'un agent pouvait apprendre un modèle génératif compact de son environnement et s'entraîner en grande partie à l'intérieur[2]. Le Genie de DeepMind, un modèle du monde fondationnel de 11 milliards de paramètres appris à partir de vidéos internet non étiquetées, génère des mondes virtuels contrôlables à l'action qu'un utilisateur ou un agent peut parcourir image par image[3] ; Genie 3 pousse cela vers des environnements 3D temps réel, photoréalistes et persistants, avec physique émergente et permanence des objets[4].

Deux familles techniques coexistent désormais. Les **modèles du monde génératifs** (Genie, NVIDIA Cosmos) synthétisent de la vidéo ou des flux de capteurs futurs et laissent des agents s'y entraîner[3][5]. Les **modèles du monde latents-prédictifs** (la lignée JEPA) prédisent dans un espace de représentation abstrait plutôt que de reconstruire des pixels, ce qui est plus efficient et, selon ses promoteurs, plus proche de ce que devrait être la prédiction ; le V-JEPA 2 de Meta apprend de plus d'un million d'heures de vidéo pour soutenir compréhension, prédiction et planification[7][8]. La distinction compte en pratique, mais l'idée partagée est le moteur du domaine : un modèle qu'on déroule pour voir ce qui arrive ensuite.

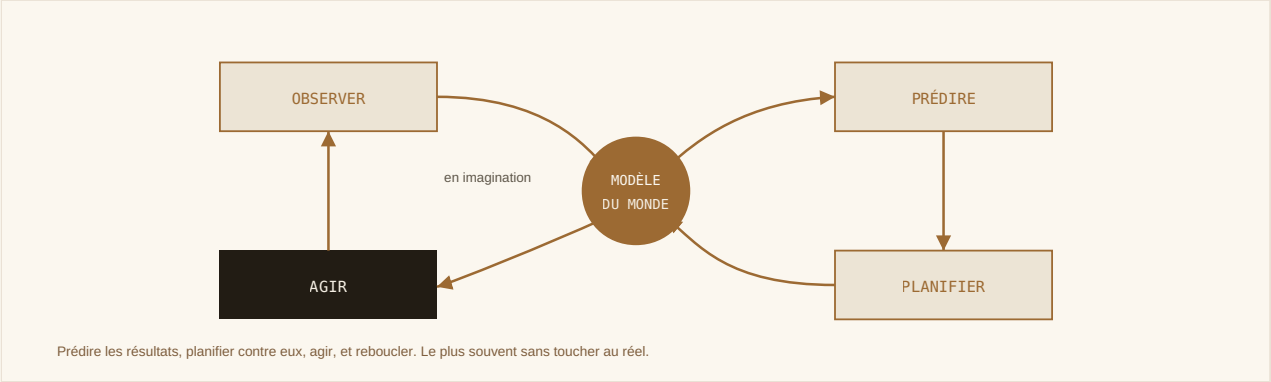


Fig. 2 · La boucle du modèle du monde. À partir d'une observation, le modèle prédit les résultats des actions candidates et planifie « en imagination », pour que seule l'action choisie atteigne le réel[2][3][7].

04 · POURQUOI CELA CHANGE L'IA PHYSIQUE

Répéter en simulation, transférer au réel

Le gain frappe le plus fort en robotique, où les données réelles sont lentes, coûteuses et risquées à collecter. Les modèles du monde permettent à un robot de répéter en simulation puis de transférer, le pipeline *sim-to-real*, avec des résultats impensables il y a deux ans. Le V-JEPA 2-AC de Meta en est l'illustration la plus nette : après un pré-entraînement sur de la vidéo internet, il est post-entraîné sur seulement **62 heures** de données robot, puis planifie des actions de saisie-dépose sur des bras Franka dans des labos qu'il n'a jamais vus, en zéro-shot, sans entraînement spécifique à la tâche ni ingénierie de récompense, en utilisant le modèle du monde pour du contrôle prédictif[7]. Le Cosmos de NVIDIA génère les données synthétiques et les mondes simulés qui entraînent robots et véhicules autonomes à l'échelle, et Cosmos 3 étend cela à des modèles omnimodaux qui traitent conjointement langage, image, vidéo, audio et action[5][6]. Des modèles génératifs comme Genie laissent des agents s'entraîner dans des environnements imaginés avant que le moindre matériel ne bouge[3][4].

62 h

De données robot suffisent à V-JEPA 2 pour planifier en zéro-shot la saisie-dépose sur des bras inédits[7].

24 fps

Mondes interactifs photoréalistes et persistants générés en temps réel par Genie 3[4].

~379 Md$

Marché projeté des jumeaux de simulation (logiciels & services) en 2034, contre ~35 Md$ en 2024[9].

Le principe sous-jacent est le même, et il est plus ancien que le deep learning : il est moins cher, plus rapide et plus sûr d'échouer en simulation que dans la réalité. Les modèles du monde industrialisent ce principe.

05 · LE PONT VERS L'ENTREPRISE

Simuler pour décider, pas seulement pour démontrer

La plupart des organisations ne construisent pas de robots, et pourraient conclure que cette frontière n'est pas la leur. Cette conclusion est fausse, et la raison est le fil de cette note : la discipline n'est pas

« construire un robot », c'est « simuler une décision avant de s'y engager ». Un jumeau numérique d'un processus métier, un pipeline de commandes, un workflow de support, une tournée logistique, est un endroit où poser la même question qu'un robot, que se passe-t-il si je prends cette action, avant de payer le coût réel de la réponse. Modéliser le processus, calibrer le jumeau sur des données réelles, simuler le changement candidat, mesurer le ROI et le risque attendus hors production, et seulement alors déployer.

> POURQUOI C'EST LE GESTE MÛR
>
> Une simulation qui se contente de rendre un processus est une démo. Une simulation dans laquelle on peut *agir* pour comparer des décisions, avec des résultats mesurés, est un instrument. La différence entre les deux est celle entre un tableau de bord et une décision, et c'est là que la valeur d'un jumeau s'accumule réellement[9].

C'est aussi là que la série LinkTec Labs boucle. Un jumeau de processus utile se bâtit sur le même substrat que les notes précédentes : une couche de contexte qui récupère le bon état (Note N°01), une mémoire qui le porte dans le temps (Note N°02), gouvernée et souveraine pour tourner sur de vraies données opérationnelles (Note N°03), et des modèles bien dimensionnés pour que la simulation reste abordable à grande échelle (Note N°04). Les modèles du monde ne sont pas un sujet à part greffé à la fin. Ils sont ce que le reste de l'architecture permet enfin de faire : décider avant d'agir.

06 · LÀ OÙ ÇA CASSE

L'écart de fidélité et l'honnêteté qu'il exige

Un modèle du monde est une prédiction, pas un oracle, et le traiter comme tel est la défaillance caractéristique de cette technologie. L'*écart sim-to-real* est réel : un modèle peut halluciner une physique plausible mais fausse, manquer entièrement des événements rares, et devenir confidemment inexact à mesure qu'il extrapole loin de sa distribution d'entraînement. Le coût d'exécution de modèles du monde haute fidélité n'est pas négligeable, et un jumeau calibré sur les données d'hier dérive à mesure que le système réel change. Rien de tout cela ne plaide contre l'approche ; cela plaide pour la même discipline guidée par la preuve que le reste de la série exige. Une décision simulée est une hypothèse. Elle se valide face au réel, se mesure après déploiement, et le jumeau se recalibre quand il dérive. La simulation gagne la confiance comme la récupération et la mémoire : en étant mesurée, pas en étant crue.

07 · UNE APPROCHE DE RÉFÉRENCE

La boucle « simuler pour décider », telle que LinkTec Labs l'applique

Les pièces se composent en une boucle fermée dont la sortie est une décision étayée par des preuves, pas un rendu. Modéliser l'actif ou le processus ; calibrer le jumeau face à des données réelles pour ancrer ses prédictions ; simuler les actions candidates dans le modèle du monde ; mesurer ROI et

risque attendus hors production ; décider ; déployer l'action choisie ; et reboucler le résultat réalisé pour recalibrer. La boucle est délibérément humble : le modèle du monde propose, la réalité dispose, et l'écart entre les deux est le signal qui maintient le jumeau honnête.

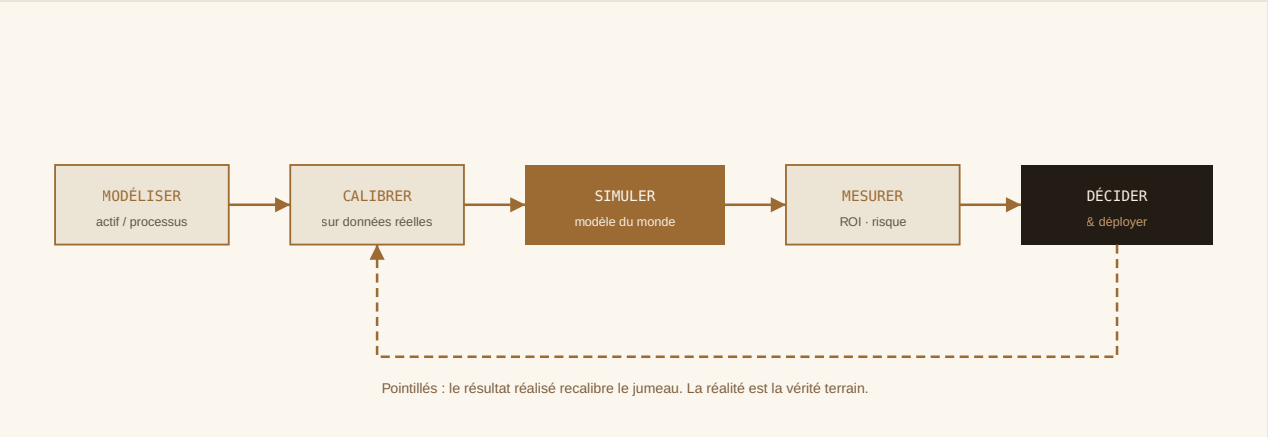


Fig. 3 · Boucle « simuler pour décider » LinkTec Labs. Modéliser et calibrer un jumeau, simuler les actions candidates dans un modèle du monde, mesurer ROI et risque, décider, déployer, et reboucler le résultat réalisé pour garder le jumeau ancré.

Quatre principes la gouvernent. **Le jumeau est calibré, pas présumé**, ses prédictions sont ancrées à une réalité mesurée avant qu'on ne s'y fie. **La simulation sert à décider**, la sortie est un ensemble classé d'actions avec leurs résultats attendus, pas un joli rendu. **La réalité est la vérité terrain**, chaque décision simulée est confrontée à ce qui s'est réellement passé, et l'écart pilote la recalibration. Et **elle tourne sur la même pile gouvernée et bien dimensionnée** que le reste de la série, donc abordable, souveraine et auditable. Les trois premiers gagnent la précision ; le quatrième la rend déployable.

08 · PLAYBOOK DU PRATICIEN

Quoi faire dès lundi

- → **Cesser de traiter le jumeau comme un tableau de bord.** Bâtissez-le pour répondre « et si j'agis », pas seulement « que se passe-t-il »[9].
- → **Gravir l'échelle délibérément.** Jumeau d'actif, puis de processus, puis modèle du monde ; ne sautez pas la calibration[5].
- → **Utiliser la simulation pour échouer à bas coût.** Répétez d'abord l'action coûteuse ou risquée dans le modèle[2][7].
- → **Exploiter le sim-to-real face à la rareté des données.** Données synthétiques et répétition battent l'attente d'événements réels rares[5][6].
- → **Calibrer, puis se fier, puis recalibrer.** Un jumeau ancré sur des données périmées est un menteur confiant.

→ **Mesurer l'écart.** La différence entre résultat prédit et réalisé est votre signal le plus précieux.

→ **Dimensionner et gouverner la simulation.** Elle doit être abordable à exécuter et sûre sur de vraies données (Notes N°03, N°04).

→ **Décider hors production.** Déplacez l'expérience dans le jumeau pour que la production ne porte que l'action choisie.

Un jumeau numérique gagne sa place dès qu'il cesse d'être un miroir pour devenir une question. Simuler la décision, mesurer l'écart, puis agir. C'est toute la discipline, et toute la série.

LinkTec Labs construit des jumeaux « simuler pour décider » sur une pile gouvernée, souveraine et bien dimensionnée, en s'appuyant sur une culture de recherche en robotique et IA pour traiter la simulation comme un instrument de décision, pas une démo. Cette note clôt notre série de recherche 2026 : contexte (N°01), mémoire (N°02), souveraineté (N°03), efficience (N°04), et maintenant simulation. **linktec.fr / labs**

RÉFÉRENCES

Sources primaires & techniques

[1] Glaessgen & Stargel. **The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles.** AIAA/NASA, 2012 (référence fondatrice du jumeau numérique), https://ntrs.nasa.gov/citations/20120008178

[2] Ha & Schmidhuber. **World Models.** NeurIPS 2018. arXiv:1803.10122, https://arxiv.org/abs/1803.10122

[3] Bruce et al. (Google DeepMind). **Genie: Generative Interactive Environments.** ICML 2024. arXiv:2402.15391, https://arxiv.org/abs/2402.15391

[4] Google DeepMind. **Genie 3: a new frontier for world models** (environnements interactifs temps réel). 2025, https://deepmind.google/discover/blog/genie-3-a-new-frontier-for-world-models/

[5] NVIDIA. **Cosmos World Foundation Model Platform for Physical AI.** 2025. arXiv:2501.03575, https://arxiv.org/abs/2501.03575

[6] NVIDIA. **Cosmos 3: Omnimodal World Models for Physical AI** (modèle fondationnel ouvert). 2026, https://www.nvidia.com/en-us/ai/cosmos/

[7] Assran et al. (Meta AI / FAIR). **V-JEPA 2: Self-Supervised Video Models Enable Understanding, Prediction and Planning.** 2025. arXiv:2506.09985, https://arxiv.org/abs/2506.09985

[8] LeCun. **A Path Towards Autonomous Machine Intelligence** (article de position JEPA). 2022, https://openreview.net/pdf?id=BZ5a1r-kVsf

[9] Gartner / analyses sectorielles. **Digital Twin of an Organization & dimensionnement du marché du jumeau numérique** (2025-2026 ; projections de revenus des jumeaux de simulation). Données de marché secondaires, attribuées dans le texte.

© 2026 LinkTec, LinkTec Labs. Note de recherche N°05. Les figures sont des schémas originaux de LinkTec Labs, d'après les études citées. Les résultats quantitatifs sont attribués à leurs sources primaires ; les tailles de marché et chiffres éditeurs sont signalés comme tels dans le texte. Cette note est informative et ne constitue pas une revendication de benchmark ou d'investissement de la part de LinkTec.