



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



LE JUMEAU NUMÉRIQUE

OUTIL STRATÉGIQUE POUR L'INDUSTRIE ET

décembre / 2025

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
L'EXPLOITATION DU JUMEAU NUMÉRIQUE PAR L'INDUSTRIE	4
▪ LE JUMEAU NUMÉRIQUE, UN RISQUE SPÉCIFIQUE DE CYBERSÉCURITÉ	4
▪ LE CLOUD, TALON D'ACHILLE DU JUMEAU NUMÉRIQUE ?	6
▪ LES JUMEAUX NUMÉRIQUES ET PHYSIQUES, BANCS D'ESSAI POUR LA CYBER-RÉSILIENCE INDUSTRIELLE	7
▪ « LES JUMEAUX NUMÉRIQUES-PHYSIQUES OFFRENT UN ENVIRONNEMENT DE TEST RÉALISTE POUR DÉRISQUER LES INVESTISSEMENTS INDUSTRIELS »	9
LES DIGITAL TWINS À LA FRONTIÈRE DU RÉEL ET DU VIRTUEL	14
▪ LE JUMEAU NUMÉRIQUE, À LA FRONTIÈRE DU VIRTUEL ET DU RÉEL	14
▪ « LE JUMEAU NUMÉRIQUE DU VIVANT EST UN OBJET DE RECHERCHE AVANT TOUT »	16
▪ A QUAND LE JUMEAU NUMÉRIQUE D'UN SYSTÈME VIVANT ?	18
▪ LES THÈSES DU MOIS : "LE JUMEAU NUMÉRIQUE, OUTIL STRATÉGIQUE POUR L'INDUSTRIE ET NOUVEAU FRONT POUR LA CYBERSÉCURITÉ"	20
▪ MAÎTRISER L'INGÉNIERIE COMPLEXE AVEC LE JUMEAU NUMÉRIQUE	21
LE JUMEAU NUMÉRIQUE, CATALYSEUR D'INNOVATIONS	24
▪ SAMP : DU JUMEAU NUMÉRIQUE À LA "RÉALITÉ PARTAGÉE"	24
▪ « DIFFUSER PLUS VITE L'INNOVATION MÉDICALE GRÂCE AU JUMEAU NUMÉRIQUE »	28
▪ UZUFLY : DES JUMEAUX NUMÉRIQUES À LA PRÉCISION DIGNE D'UNE HORLOGE SUISSE	30

INTRODUCTION

À mesure que l'industrie 4.0 connecte les capteurs, les automates, la supervision et le cloud, le besoin devient grand d'ouvrir les systèmes pour gagner en performance, sans transformer l'usine en porte d'entrée pour des cyberattaques. Le cœur du problème tient à l'héritage industriel, qui voit des environnements OT conçus il y a 20 à 30 ans, souvent basés sur des systèmes anciens, historiquement protégés par leur isolement.

Or, l'optimisation des performances exige désormais de faire circuler la donnée entre IT et OT. Cette convergence est donc indispensable, mais périlleuse à plusieurs titres, si elle est menée comme un simple raccordement technique. C'est dans ce contexte qu'émerge par exemple l'architecture Unified Namespace (UNS), présentée comme une réponse opérationnelle à un débat souvent théorique. L'UNS vise à créer un référentiel unique et un langage commun permettant aux systèmes hétérogènes d'échanger des données dans les deux sens, sans utiliser de solutions précaires pour y parvenir. En clarifiant les échanges et en unifiant les espaces de noms, l'UNS promet plus de cohérence, de temps réel et d'interopérabilité. Mais ce gain a un prix. En effet, qui dit plus de connexions dit plus de surface d'attaque. Chaque capteur IoT, chaque passerelle, chaque service cloud additionnel multiplie les vecteurs possibles d'intrusion. D'où une exigence centrale, celle de concevoir la cybersécurité dès l'architecture, et non la greffer après coup. Les mesures évoquées illustrent une logique de "sécurité par zones" : définir ce qui peut parler à quoi, et comment. L'enjeu n'est pas de tout bloquer - au risque de tuer l'agilité recherchée - mais de maîtriser les flux pour préserver à la fois la performance et la résilience.

Les jumeaux numériques aggravent encore ce dilemme. Ils apportent visibilité et simulation, mais concentrent aussi l'ingénierie de l'usine - exposition de propriété intellectuelle, espionnage, sabotage, altération des données (et donc des décisions) -, avec un risque particulier lorsque le jumeau influence le réel.

L'EXPLOITATION DU JUMEAU NUMÉRIQUE PAR L'INDUSTRIE

LE JUMEAU NUMÉRIQUE, UN RISQUE SPÉCIFIQUE DE CYBERSÉCURITÉ

Si le développement des jumeaux numériques dans les usines permet une plus grande efficacité industrielle, il est également vecteur de nouvelles vulnérabilités informatiques, et pose donc une problématique supplémentaire en termes de cybersécurité.

Dans l'ensemble des secteurs industriels, des **chaînes d'assemblage automobiles** aux infrastructures énergétiques, les jumeaux numériques se sont imposés comme un levier majeur d'optimisation opérationnelle. En superposant en temps réel un modèle virtuel aux outils physiques, ils permettent aux entreprises d'avoir une visibilité accrue sur leurs process. Ce qui présente de nombreux avantages, par exemple en termes de maintenance prédictive, de mise au point de nouveaux produits ou encore de simulation, qui plus est sans impacter la production.

En parallèle de cette **adoption croissante** se pose le problème des risques que les jumeaux numériques engendrent en termes de cybersécurité. Car cet outil à disposition des ingénieurs se révèle aussi être une surface d'attaque à part entière, susceptible d'être exploitée par des acteurs malveillants, désormais **capables de s'introduire au cœur même des opérations industrielles**. En effet, c'est dans la nature même du jumeau numérique d'être un système interconnecté, alimenté par une multitude de données issues de capteurs IoT, des plateformes de supervision d'usine et des logiciels de simulation. La continuité de flux entre le monde physique et son reflet virtuel crée une **dépendance structurelle à la qualité et à l'intégrité des données**.

Ainsi, une attaque visant à dégrader la qualité - en termes de données - de ces flux permettrait d'altérer les modèles prédictifs, de détourner des paramètres d'optimisation ou de masquer des anomalies critiques sur le terrain. Par exemple, la **modification subtile d'un jeu de données** d'en-

traînement ou de fonctionnement peut se traduire, sans alerte apparente, par des décisions automatisées erronées dont les **conséquences peuvent aller de l'augmentation de la consommation énergétique à la défaillance de composants stratégiques** d'un outil de production industrielle

Un outil complexe difficile à sécuriser.

La complexité technologique des jumeaux numériques rend également leur sécurisation difficile. Ils reposent sur une combinaison d'**environnements logiciels hétérogènes**, souvent issus de fournisseurs différents, intégrant des couches d'IA, de simulation physique, de SCADA, et d'edge computing.

Chacune de ces couches constitue un **point d'entrée potentiel pour une cyberattaque**. Les interfaces entre ces systèmes - en particulier lorsqu'ils sont conçus rapidement pour répondre à des impératifs d'innovation ou de compétitivité - peuvent introduire des vulnérabilités non détectées. Dans de nombreux cas, les segments OT normalement isolés se retrouvent exposés à des risques, en raison de la connexion du jumeau numérique avec des services cloud ou des plateformes d'analyse externes. Cette ouverture, souvent indispensable au fonctionnement du modèle, remet en cause les principes historiques de cloisonnement sur lesquels reposait la cybersécurité industrielle. **Et sur lesquels elle repose encore aujourd'hui chez de nombreux acteurs industriels.**

Ce n'est pas tout. D'autres vulnérabilités sont inhérentes à l'utilisation des jumeaux numériques. **Le risque d'espionnage par exemple**. Un jumeau numérique ne se limite pas à refléter l'état d'un équipement : il renferme également des connaissances sensibles sur les procédés de fabrication, la structure des machines, les stratégies d'optimisation ou les contraintes physiques d'un système. Pour un concurrent ou un État hostile, l'accès à ce modèle représente un raccour-

ci vers la compréhension profonde des secrets industriels qu'il contient.

Il existe également un risque de sabotage direct, particulièrement préoccupant dans les secteurs à forte criticité comme l'aéronautique, l'énergie, le nucléaire ou la chimie. Les jumeaux numériques interviennent en effet de plus en plus dans les processus de validation et de certification. Toute altération du modèle, qu'elle soit due à une injection de code malveillant, à une corruption de données ou à un détournement d'algorithme, peut biaiser des résultats de simulation et conduire à valider des systèmes défaillants.

Ces risques, souvent critiques pour les industriels opérant les jumeaux numériques, justifient à eux seuls une nouvelle approche du risque cyber, pour exploiter cet outil industriel sans restrictions.

11/12/2025

LE CLOUD, TALON D'ACHILLE DU JUMEAU NUMÉRIQUE ?

L'interconnexion permanente entre les jumeaux numériques et le cloud, qui l'alimente en données, constitue une brèche potentielle en termes de cybersécurité.

En reliant le monde physique et le monde numérique, le "digital twin" constitue un point sensible, d'autant plus que son fonctionnement dépend largement de données stockées et traitées dans le cloud. Cette **interconnexion permanente crée une surface d'attaque beaucoup plus large** que dans une architecture industrielle traditionnelle.

Pour fonctionner, un jumeau numérique agrège des données provenant d'une multitude de sources - **capteurs IoT**, systèmes OT, bases de données internes ou applications de supervision -. Cette complexité, qui fait sa force, est aussi son principal point faible. L'**ANSSI** souligne d'ailleurs régulièrement que la multiplication des objets connectés, souvent mal sécurisés, ouvre autant de portes potentielles aux cyberattaques, surtout lorsque ces objets se trouvent **en lien direct avec les systèmes industriels**. Dans le cadre d'un jumeau numérique, la compromission d'un capteur ou d'une passerelle peut permettre d'accéder à des données cruciales ou d'introduire de fausses informations dans le modèle, faussant ainsi les analyses et les décisions opérationnelles. Pour un résultat potentiellement catastrophique au niveau opérationnel, voire dangereux pour l'humain.

Les données industrielles, souvent sensibles, sont aujourd'hui de plus en plus hébergées dans des environnements cloud. La migration vers ces plateformes présente des avantages en termes de flexibilité, mais expose également les entreprises à des risques accrus, **comme le rappelle la CNIL** : erreurs de configuration, insuffisance des contrôles d'accès ou absence de chiffrement, constituent des vecteurs d'attaque courants dans les environnements cloud.

Dans le cas du jumeau numérique, une fuite ou une intru-

sion dans le cloud peut révéler non seulement des **informations techniques sur les installations réelles**, mais aussi des modèles d'ingénierie stratégiques ou des secrets industriels. Dans des secteurs comme l'énergie, le transport ou la santé, ces données possèdent une valeur économique - voire géopolitique - considérable.

Mais les risques ne se limitent pas au vol d'informations. Une attaque visant à modifier les données envoyées au jumeau numérique ou issues de celui-ci pourrait avoir des conséquences directes sur les opérations physiques. La fiabilité des données et la maîtrise des flux d'information sont essentielles lorsqu'un système numérique influence potentiellement le comportement d'installations sensibles, notamment dans les industries à risques. Une altération malveillante pourrait provoquer une mauvaise décision de maintenance, une surestimation de l'usure d'un équipement, ou au contraire une absence d'alerte avant une défaillance réelle.

Enfin, la question de la **souveraineté et de la maîtrise des données se pose évidemment**. La montée en puissance des jumeaux numériques dans les infrastructures publiques nécessite une nouvelle doctrine sécuritaire quant à l'hébergement des données aux prestataires sollicités pour faire ce travail. Ce problème s'étend aujourd'hui aussi au secteur privé, notamment pour les entreprises industrielles qui dépendent d'un cloud non souverain pour stocker la représentation complète de leur outil de production.

Ce qui nécessite la refondation complète de l'approche de la sécurité informatique des outils industriels, car l'équilibre à trouver entre une sécurité absolue, qui limiterait les usages du jumeau numérique, et un laxisme fatal pour la pérennité de l'outil "jumelé" est tenu.

15/12/2025

LES JUMEAUX NUMÉRIQUES ET PHYSIQUES, BANCS D'ESSAI POUR LA CYBER-RÉSILIENCE INDUSTRIELLE

La convergence IT/OT s'impose aujourd'hui comme un impératif pour l'industrie 4.0. Pourtant, cette ouverture nécessaire des systèmes de production expose les infrastructures critiques à des cybermenaces croissantes.

Face à ce paradoxe, une approche innovante émerge rapidement : l'utilisation de jumeaux numériques et physiques utilisés comme des environnements d'entraînement à la **cyber-résilience**. Au-delà de la simple modélisation, ces répliques permettent de tester, valider et optimiser les architectures de sécurité, avant leur déploiement en production.

L'architecture **Unified Namespace** (UNS) constitue par exemple une réponse concrète aux défis de la convergence IT/OT. Contrairement aux approches traditionnelles cloisonnées, l'UNS établit un référentiel unique permettant à l'ensemble des systèmes industriels de communiquer grâce à un langage normalisé. Cette architecture ouverte **facilite la circulation bidirectionnelle des données** entre les automates programmables, les systèmes Edge, et les infrastructures cloud... Cependant, cette connectivité accrue multiplie mécaniquement la surface d'attaque. **Chaque nouveau capteur IoT**, chaque connexion supplémentaire représente un vecteur d'intrusion potentiel. La mise en œuvre de l'UNS exige donc une approche cybersécuritaire rigoureuse dès la conception, intégrant tout à la fois segmentation réseau, firewalls contextuels, et serveurs d'administration dédiés. L'enjeu consiste donc à **préserver l'agilité opérationnelle sans sacrifier la sécurité**, un équilibre difficile à trouver, qui nécessite des tests approfondis.

Les limites des jumeaux purement numériques

Les grands industriels ont massivement investi dans des jumeaux numériques hébergés sur des clouds publics ou privés. Ces environnements virtuels permettent de modéliser mathématiquement le comportement des installations. Toutefois, une problématique émerge : les **contraintes de cyber-sécurité** imposées à ces clouds les rendent parfois quasi-inutilisables. Des cycles de développement qui devraient prendre quelques jours s'étendent sur plusieurs mois. Pour résumer, les contraintes appliquées aux systèmes pour maintenir une sécurité optimale **grèvent leur agilité**.

Plus fondamentalement, la modélisation purement théorique atteint ses limites face à la complexité des interactions réelles. Les "effets cocktails", ces dysfonctionnements imprévisibles résultant de l'interaction entre plusieurs mises à jour ou configurations, ne peuvent être anticipés par les seuls algorithmes.

Le jumeau numérique et physique combine une modélisation logicielle et le matériel réel. Cette approche hybride permet de reproduire fidèlement les conditions opérationnelles : capteurs de vibration, caméras industrielles ou encore équipements de communication réseaux sont physiquement présents et configurés.

Cette réplication physique s'avère particulièrement **pertinente pour la cyber-sécurité**. Les industriels peuvent **simuler des scénarios d'attaque réalistes** : débranchement de câbles Ethernet, compromission de capteurs, saturation de bande passante, ou injections de logiciels malveillants, entre autres. Les réactions du système sont observables en temps réel, ce qui permet d'ajuster finement les paramètres de sécurité, avant leur implémentation en production.

Les gigafactories représentent des [investissements dépassant le milliard d'euros](#), tandis que des usines conventionnelles coûtent entre 10 et 50 millions d'euros. Les erreurs de conception - qu'elles concernent la cyber-sécurité, l'interopérabilité des systèmes, ou l'architecture logicielle – génèrent alors des surcoûts considérables.

Le jumeau numérique et physique permet donc de tester des solutions logicielles coûteuses dans un environnement maîtrisé. Lorsqu'un incident survient en production, sa reproduction dans l'environnement de test facilite l'analyse et la résolution des problèmes, sans perturber la chaîne de fabrication. Cette approche s'inscrit dans une logique agile de dérisquage, où l'échec dans un environnement contrôlé devient une opportunité d'apprentissage plutôt qu'une fatalité.

Un changement de paradigme nécessaire

Au-delà des aspects techniques, l'adoption de ces solutions exige une transformation culturelle profonde. Les usines fonctionnant depuis 20 à 30 ans sur des systèmes isolés doivent évoluer vers une connectivité maîtrisée.

La cyber-sécurité ne doit ainsi plus être considérée comme une brique ajoutée à posteriori aux systèmes existants, mais elle doit être intégrée dès la conception, avec des cycles de développement réalistes, c'est-à-dire longs. Les jumeaux numériques et physiques constituent alors un outil stratégique pour cette transition, permettant d'allier innovation et sécurité, dans un contexte industriel en profonde mutation.

16/12/2025

« LES JUMEAUX NUMÉRIQUES-PHYSIQUES OFFRENT UN ENVIRONNEMENT DE TEST RÉALISTE POUR DÉRISQUER LES INVESTISSEMENTS INDUSTRIELS »

La sécurisation des usines connectées est une problématique centrale dans la construction des nouvelles usines, qui doit être pensée très en amont.

Dans le contexte de l'industrie 4.0 et de la transformation numérique des usines, la [question de la cybersécurité](#) devient centrale. Comment connecter les systèmes de production tout en les protégeant contre les [cyberattaques](#) ?

Vincent Thavonekham, Président cofondateur de FactoVia et spécialiste de la connectivité des systèmes industriels, ainsi que Itamar Ferreira Dos Santos, expert en cybersécurité OT/IoT, ont expliqué aux Techniques de l'Ingénieur comment l'architecture Unified Namespace (UNS) et les jumeaux numériques-physiques peuvent répondre à ces défis.

Pouvez-vous nous présenter le contexte et les enjeux de la sécurisation des installations industrielles ?

Vincent Thavonekham : Sans être RSSI, mon rôle est de concevoir des architectures de données industrielles qui intègrent nativement les contraintes de cybersécurité dès la conception. C'est là tout l'enjeu. Or, les données, il y en a partout, et les usines reposent généralement sur deux domaines d'informatiques distincts : l'informatique industrielle de production d'un côté, et l'informatique de gestion et de supervision métier de l'autre, ce qu'on appelle respectivement en anglais « Operational Technology » (OT), et « Information Technology » (IT).

Le problème, c'est que beaucoup d'usines tournent encore

sur des systèmes d'exploitation anciens, donc sous de vieilles versions de Windows non maintenues. On parle de "legacy". La plupart des entreprises ont fait un mur autour de ces systèmes pour éviter les attaques, ou que les données ne s'échappent. Mais aujourd'hui, tout va plus vite, et pour mieux gérer la production, optimiser l'énergie, on a besoin d'ouvrir ces systèmes. Or, si on les ouvre sans précaution, cela peut constituer une [porte d'entrée à toutes les attaques possibles](#). L'enjeu n'est pas d'opposer IT et OT, mais de les faire collaborer dans un cadre architectural maîtrisé et cybersécurisé : il y a des techniques éprouvées pour cela ! Encore faut-il avoir l'expérience pour savoir les mettre en place.

C'est toute la problématique de ce qu'on appelle la convergence IT/OT : on en a absolument besoin, le monde entier en a besoin, mais comment la mettre en place concrètement au-delà des livres blancs et séminaires ?

Ma spécialité, c'est justement cette connectivité et interopérabilité que l'on étend généralement au cloud - cloud privé ou public. Aujourd'hui, avec mes 15 ans d'expérience sur des projets d'envergures, je travaille sur un principe d'architecture mondial ouvert et gratuit, qui s'appelle Unified Namespace, ou UNS.

Qu'est-ce que l'Unified Namespace exactement et comment fonctionne-t-il ?

Vincent Thavonekham : L'UNS, est une réponse concrète à la problématique de convergence IT/OT. Ce n'est ni un produit, ni une architecture, mais un principe d'architecture.

La nuance est vitale ! Cela permet de structurer et contextualiser les flux de données industrielles. Nous le mettons en place dans les groupes industriels (aéronautique, automobile, transport, énergie, industrie manufacturière...) mais aussi dans d'autres secteurs comme la santé, en particulier pour la gestion des groupes hospitaliers... Ces groupes ont des budgets R&D conséquents, mais ne savent pas comment faire en sorte que la donnée reste de qualité dans le fonctionnement quotidien des systèmes productifs. En effet, sur le papier tout est parfait, mais dans le monde réel la donnée est produite par des systèmes parfois défaillants, ou manipulée par des humains. Ce qui la rend incomplète, voire corrompue. Le risque est le fameux "garbage in, garbage out", c'est-à-dire qu'une donnée de mauvaise qualité en entrée génère un résultat productif de mauvaise qualité à la sortie. Ce risque est encore plus aigu quand il s'agit d'intégrer de l'IA dans les systèmes industriels. Concrètement, l'UNS permet à tous les systèmes de l'usine, et même en dehors, de dialoguer entre eux, et cela jusqu'au cloud, dans les deux sens. Décrit ainsi, cela peut sembler trivial ; toutefois, dans un contexte de cybersécurité accru, combiné à des normes industrielles complexes, cela ne l'est pas. L'UNS se base sur des principes d'innovation d'usage de rupture, et répond enfin aux challenges de la majorité des industriels qui rencontrent des problématiques structurales de données en silos. Avant, chaque intervenant de l'entreprise était doué sur son sujet : l'automaticien était bon en automatisme, l'informaticien décisionnel était expert en « datawarehouse »... et l'équipe cybersécurité contraignait tous les accès de tout le monde. Conséquence, l'informatique était morcelée en silos ; pour continuer à fonctionner et contourner cela les ERP, comme SAP ou autre par exemple, envoyait les informations sous forme de fichiers texte, et le moindre décalage de caractère dans le fichier cassait toute la production. Autre exemple en 2025, on imprime toujours des étiquettes éphémères, d'une durée de vie de 5 minutes, le temps d'être lues après par un autre système, qui va lui-même imprimer une étiquette définitive. Des tonnes de papier par an gaspillé dans le monde, car il manque une continuité numérique.

Je trouve que l'UNS porte mal son nom, car trop technique et créé de nombreuses ambiguïtés. A l'origine, il unifie tous

les "namespaces", c'est-à-dire tous les espaces de noms des différents systèmes informatiques, pour qu'ils puissent circuler partout où c'est autorisé, en temps réel, et sans conflit ; un peu comme le même nom de rue, mais avec un code postal différent. C'est comme si on avait créé l'espéranto pour l'usine : L'UNS agit comme un modèle de données partagé, lisible à la fois par les machines et par les équipes humaines de différentes nationalités et BU. Et surtout, il s'agit d'un référentiel véritablement unique : Entre-prepôts/stocks, commandes, capteurs, décisionnel, maintenance, RH ... tout est unifié, partout. Par contre, l'UNS ne remplace pas les systèmes existants, il les orchestre sans « couplage rigide » entre les différents éléments, contrairement à d'autres principes.

Mais qu'est-ce que cela implique en termes de cybersécurité ?

Itamar Dos Santos Ferreira : Quand Vincent décrit l'UNS, on comprend qu'on vient ajouter de nouveaux systèmes, de nouvelles connexions pour améliorer la production. Mais d'un point de vue cyber, cela signifie qu'on ajoute ce qu'on appelle une surface d'attaque supplémentaire. Plus on a de systèmes connectés, plus on a de chances de se faire attaquer.

Il faut donc que, dès la conception de ces systèmes UNS, tout soit bien cadré. On ne peut pas tout bloquer, sinon on perd l'agilité qui est justement l'objectif de la solution. Si on bloque tout, on n'est plus agile et on perd la fonction même du produit.

Côté UNS, nous travaillons sur la sécurisation de la plate-forme elle-même et l'environnement cloud qui va fournir ces services. Avec les jumeaux numériques, il y a aussi tous les risques liés à l'exposition : toute l'ingénierie de l'usine se retrouve modélisé dans ces jumeaux numériques. Si c'est compromis, il y a une perte importante de propriété intellectuelle, des risques de sabotage... On alerte donc les clients sur ces problématiques. Dans un jumeau numérique, il faut s'assurer de l'anonymisation des données, s'assurer qu'on ne met pas d'informations confidentielles dans ces environnements, et que l'interconnexion entre ces systèmes se fait de manière sécurisée.

Concrètement, quelles sont les mesures de sécurité mises en place ?

Itamar Dos Santos Ferreira : Afin de ne pas impacter les véritables usines, on crée des « environnement de laboratoires » qui reproduisent les principes architecturaux critiques, selon une approche s'inscrivant dans les référentiels CRA, NIS 2, IEC 62443 (ISA-95) et les principes Zero Trust, avec un curseur pragmatique et ajusté à l'OT. On ne reproduit pas l'intégralité d'un site industriel, mais on rajoute des « bouchons », plus connu sous le nom de « Mocks / Stubs » en anglais. Puis on travaille sur la segmentation réseau pour isoler les différents systèmes. Chaque système a une couleur différente selon son niveau de sensibilité, et on définit précisément quels flux sont autorisés à passer entre eux.

Il y a évidemment un firewall qui isole toute communication vers l'extérieur de l'usine, qui doit passer par des infrastructures sécurisées. On utilise aussi ce qu'on appelle un « jump server », un serveur dédié pour l'administration. Si on ne passe pas par là, on ne peut pas modifier le reste du système, qui est vue comme une boîte noire.

Côté cloud, il y a toute la partie séparation des groupes de sécurité et isolation des services. La sécurisation de la communication entre l'usine et le cloud passe en général par un VPN. A noter que, sans entrer dans les détails, les techniques de l'UNS permettent d'administrer l'OT, avec les principes de sécurité sous-jacentes au VPN, sans passer par un VPN. Ce sont toutes ces briques que l'on va implémenter dans un laboratoire pour s'assurer que tout fonctionne de manière sécurisée.

Quel est le rôle du jumeau numérique-physique dans cette approche ?

Vincent Thavonekham : C'est un point crucial. Tout le monde parle de jumeaux numériques, qu'on modélise par exemple auprès les acteurs leaders du cloud public (Azure, Amazon, Google). Le problème avec les gros industriels, c'est qu'ils ont tellement cybersécurisé leur cloud public, qu'il est devenu presque inutilisable pour des usages d'expérimentations Agiles. Moi qui suis un ancien expert cloud, je ne peux pas travailler efficacement dans ces environnements hautement bridés.

C'est pourquoi on a créé un jumeau numérique ET physique. La partie physique, c'est tout le matériel réel de l'OT : capteurs de vibration, automates, caméra, écrans industriels... Ces équipements coûtent une petite fortune, mais imaginons que l'on repère dans une usine un problème de mise à jour logiciel, survenu, on suppose, suite au branchement d'un câble réseau sur une caméra. C'est assez étrange comme problème, et on veut en savoir plus, avec plusieurs tests. Or on ne peut pas interrompre la production et gêner les collègues de l'usine à faire des tests d'investigations durant plusieurs jours. Dans un jumeau purement numérique, on ne pourrait pas diagnostiquer rapidement ce problème. C'est la limite de la modélisation « numérique » : c'est trop théorique et mathématique ! Là, dans un laboratoire numérique-physique, je branche le câble réseau physique, ça marche ou ça ne marche pas. Donc, si on a un problème en production, on le recrée en physique-numérique de dehors de l'usine ; une fois qu'on a compris, on réimporte notre connaissance dans l'usine réelle. A l'inverse, avant de créer une nouvelle usine à 50 millions ou 1 milliard d'euros, on peut tout tester dans cet environnement de jumeau numérique-physique afin de débusquer les problèmes et dérisquer les projets ; plus on travaille dessus, plus on économise de coûts en ne perturbant pas la production.

Enfin, le jumeau numérique-physique permet de tester les paramètres de cybersécurité des systèmes industriels. On peut jouer avec les réglages des firewalls, la segmentation des réseaux, les « EDR », réaliser des tests de pénétration... et trouver le point optimal entre protection et agilité. Sans tout sur-sécuriser, ni sous-sécuriser non plus.

Un changement culturel est-il nécessaire dans l'industrie pour adopter ces approches ?

Itamar Dos Santos Ferreira : Absolument. On a toujours grandi dans un monde industriel où il fallait impérativement isoler les systèmes de production. Mais aujourd'hui, on a besoin de plus en plus de visibilité pour améliorer la production. On rajoute donc des capteurs, de l'IoT, et on commence à connecter tout ça. C'est la fameuse convergence IT/OT qui se termine trop souvent en échec sécuritaire et en résistance au changement.

Le problème, c'est qu'on se retrouve avec d'anciens systèmes qui n'étaient pas du tout prévus pour ça, et qui commencent à recevoir des éléments connectés. Le risque devient donc énorme. Ces usines sont là depuis 20-40 ans, il n'y avait pas d'attaques dans ces environnements à l'époque. Donc souvent, les ingénieurs pensent que ces attaques ne se produiront jamais, mais la menace augmente pourtant tous les ans, et cible de plus en plus les systèmes industriels.

Les attaques cyber sont apparues autour de 2008 dans le monde industriel et se sont banalisées depuis les années 2020. La plus récente a eu lieu chez Jaguar Land Rover, avec plusieurs mois d'arrêt complet et de perturbations d'au moins 3 usines, et des coûts records estimés à plus de 2 milliards €. Les conséquences économiques et humaines peuvent être catastrophiques, d'où l'importance des nouvelles réglementations européennes et en particulier de NIS 2 qui vise à sécuriser les infrastructures critiques.

Vincent Thavonekham : C'est un vrai changement de paradigme. Dans l'industrie, on entend souvent : "ça marche, ça a toujours marché, on ne change pas ! ". Je rencontre régulièrement des entreprises qui pensent pouvoir déployer un projet en six mois... Or, rien que la partie de procédures en cybersécurité dans un grand groupe, c'est déjà six mois, minimum. Dans le médical, c'est un an si on est rapide, et souvent plusieurs années.

Les gens ne comprennent pas encore la complexité de ce genre de projets. Ils imaginent que c'est facile : on achète quelques équipements et des capteurs, on met des firewalls, et ça marche. Mais ce n'est pas du tout ça. C'est un véritable métier qui ne s'improvise pas, et c'est pour cela qu'on fait des événements au niveau associatif, pour sensibiliser.

La cybersécurité doit-elle être pensée dès la conception des projets ?

Vincent Thavonekham : Exactement. Il y a un peu cette idée de construire son usine, de la faire fonctionner, et la cybersécurité est quelque chose qui vient après. Alors qu'aujourd'hui, il faut l'intégrer dès le départ, dès la conception.

Un projet d'usine connectée, si cela n'est pas bien organisé,

c'est facilement trois ans de perte de temps, où il ne s'est quasi rien passé, juste des discussions, des réunions, des schéma et des preuves de concepts (PoC). Le projet n'a même pas débuté. Les industriels se disent qu'ils vont faire ça en interne, y compris la partie « Change Management », que c'est facile. Puis n'y arrivant pas, ils demandent de l'aide. C'est tout l'intérêt des coachs externes, qui accompagnent ces industriels, où la phase de « résistance au changement » fait partie des Lois de la nature, et que cela suit une évolution naturelle de l'augmentation de maturité de l'industriel. En effet, facilité par le coach, il doit lui-même faire sa route et avoir sa propre opinion, avant de demander de l'aide sur la mise en place de l'UNS.

Est-ce accessible aux petites entreprises avec des budgets limités ?

Vincent Thavonekham : Oui, absolument. Je donne des cours à des étudiants de troisième année en informatique pour alimenter le marché de l'industrie avec des sachants, et c'est aussi l'occasion de prouver que même des jeunes, qui n'ont pas encore débuté leur carrière, peuvent arriver à comprendre l'UNS en trois ou quatre jours, et cela avec très peu de moyens.

Il n'y a donc pas d'excuse pour dire que ça coûte trop cher. Le problème n'est pas financier, il est dans la tête. Le professionnel se met des freins cognitifs par crainte du changement, là où les jeunes accueillent volontiers l'information avec enthousiasme. On en revient au besoin d'avoir un bon coach pour aider à faire son chemin.

Après la phase de conception, nous utilisons des Bonnes Pratiques éprouvées pour déployer une phase « pilote » en production (et non un PoC), où on vise d'avoir des résultats tangibles en 12 semaines. Ce laps de temps court est volontaire pour maintenir motivé les équipes, et ajuster rapidement si besoin.

Comment évaluer le retour sur investissement de ces solutions ?

Vincent Thavonekham : C'est une question cruciale. On parle souvent de ROI. Mais ces projets d'envergure représentent avant tout la fondation stratégique de l'industriel. Il n'y a pas de ROI stricto-sensu ; par contre, il y a plusieurs

cas de figure et je vais en présenter trois.

Pour aller au-delà du ROI, il existe une méthode en cours de brevet, développée par Bindioa Ouali, Head of Industrial architectes & smart factory, de Safran Aircraft Engine, spécialisé dans l'industrialisation d'usines. Cette méthode est appelée EVA(R□D) : La valeur économique de la Transformation Digitale. Dans des secteurs fortement régulés comme le nucléaire ou l'automobile, les décisions d'investissement sont avant tout dictées par la conformité réglementaire, la maîtrise du risque et la capacité à rester sur le marché. L'électrification de l'automobile en est un bon exemple : Nous voyons bien que l'Europe ne demande pas aux constructeurs leurs avis, et savoir s'il y a un ROI immédiat ou non. Dans les secteurs régulés, la conformité et la résilience constituent une forme de ROI stratégique.

Une méthode que nous sommes plusieurs à recommander, c'est simplement de faire des sondages auprès des gens de terrain. On va voir le responsable qualité, la maintenance, les opérateurs... et on fait des interviews pour comprendre combien de temps ils perdent par an, et l'impact financier que cela génère. On peut être surpris des réponses, par exemple « je perds 1 jour par semaine à copier-coller des EXCEL, et en plus cela génère des erreurs » ou alors « chaque panne, c'est entre 50k□ et 500k□ de perte ; et j'ai x pannes par an ». C'est une méthode de sondage à 360°, pas un calcul ROI classique. Il y a de nombreuses méthodes différentes pour évaluer un projet. Ca peut varier énormément, mais c'est mieux que rien ! L'important, c'est d'avancer avec le principe mathématique du "cône d'incertitude" : tant qu'à être dans l'incertitude, on part sur une hypothèse et plus on avance, plus c'est précis. Sinon, on reste bloqué pendant trois ans en status quo.

Quels sont les principaux défis que rencontrent les usines aujourd'hui concernant leurs données ?

Vincent Thavonekham : Les données sont hétérogènes et

en silos, c'est le point commun à toutes les usines. Premièrement, les données sont hétérogènes. Il y a des automates programmables, des ERP, et pleins d'autres systèmes. Deuxièmement, les données industrielles sont incorrectes - même dans le médical, c'est incorrect -. Troisièmement, elles ne sont pas contextualisées.

Il y a aussi le problème de la source de vérité unique, l'interopérabilité - mon capteur qui ne marche pas est peut-être non interopérable avec d'autres marques - et enfin, il n'y a pas de temps réel. Il faut attendre cinq heures, cinq jours, cinq mois ! Et parfois, au bout de six mois, on n'a toujours pas réussi à récupérer la donnée, parce qu'elle est trop cybersécurisée ou les anciens logs sont effacés.

Il faut bien se rappeler que certaines usines, comme Jaguar au Royaume-Uni, où j'ai travaillé, c'est tellement grand que l'on s'y déplace en vélo ou en bus d'un point à un autre. C'est pour ça que j'ai créé un laboratoire externe, où on a tout sous la main dans un environnement contrôlé.

Un mot de conclusion ?

La sécurisation des usines connectées ne peut plus être une réflexion « après coup ». Elle doit être intégrée dès la conception des projets, avec des architectures comme l'Unified Namespace qui permettent à la fois l'ouverture nécessaire à l'optimisation et la protection contre les cybermenaces. Les jumeaux numériques-physiques offrent un environnement de test réaliste pour dérisquer les investissements.

Le principal défi reste culturel : il faut passer d'une approche cloisonnée à une vision holistique de la connectivité industrielle, où cybersécurité et performance ne s'opposent plus, mais se complètent. C'est un changement de paradigme nécessaire pour l'industrie française et européenne, qui doit rattraper son retard dans ce domaine.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

17/12/2025

LES DIGITAL TWINS À LA FRONTIÈRE DU RÉEL ET DU VIRTUEL

LE JUMEAU NUMÉRIQUE, À LA FRONTIÈRE DU VIRTUEL ET DU RÉEL

Le jumeau numérique est le point de convergence des technologies de simulation numérique de phénomènes physiques complexes. Élaboré selon des multi-échelles et à partir de multi-résolutions, il permet la co-construction d'un objet d'études. Il nécessite cependant l'apport de nombreuses compétences faites d'expertise humaine, de simulation numérique et, de plus en plus, d'intelligence artificielle.

Un extrait de « **Jumeau numérique et réalité virtuelle pour la modélisation de systèmes complexes** », par Pierre-Antoine BEAL, Cyril SEPTSEAUT, Matthieu AUBRY, Lise LORENZATO, Pierre-Armand THOMAS.

Dans un système complexe, la variété des modèles employés – tout autant que leurs capacités à retrancrire une évolution souvent non linéaire et difficile à appréhender par l'esprit humain – représente une difficulté.

Simulation vs jumeau numérique

Le jumeau numérique est une réplique virtuelle dynamique d'un système physique réel. Il centralise les connaissances, données, simulations et interactions relatives à ce système, et se distingue des simples outils de simulation par sa capacité à évoluer en temps réel grâce aux informations transmises par des capteurs. Cette connexion permanente lui permet de retracer l'historique du système, d'en analyser l'état actuel et d'anticiper son évolution future. Il peut également constituer un atout majeur lors de la certification d'un produit.

Conçu pour accompagner le système tout au long de son cycle de vie, de la conception à la fin d'exploitation, le jumeau numérique se construit sur une architecture modulaire, capable d'intégrer les évolutions du système réel. Il

est interopérable, ce qui lui permet de communiquer avec d'autres jumeaux, capteurs physiques ou logiciels tiers. Sa richesse réside aussi dans sa dimension multidisciplinaire, en réunissant des modèles issus de domaines variés – physique, économie, facteurs humains – facilitant ainsi le dialogue entre experts et une approche globale du système.

La capacité du jumeau numérique à représenter fidèlement les phénomènes repose à la fois sur son expressivité, c'est-à-dire la variété des scénarios qu'il peut reproduire, et sur sa précision, mesurée par l'écart entre simulations et données réelles. Il permet ainsi de tester virtuellement des scénarios (opération compliquée ou en conditions dégradées, remplacement d'un système, paramétrage, etc.) et de choisir le meilleur.

Des enjeux forts

Le jumeau numérique doit être autonome et reproduire au mieux le comportement d'un système physique. Il pourra ainsi servir de véritable tableau de bord, voire proposer des assistants intelligents pour la **maintenance prédictive** par exemple. Enfin, le jumeau numérique est aussi une manière de structurer la donnée pour la rendre intelligible, ce qui permet d'imaginer de nouveaux « business model ».

Les cas d'usage du jumeau numérique sont multiples. Il permet d'éclairer les choix stratégiques en simulant différentes hypothèses, d'optimiser en temps réel les performances d'un système ou de planifier sa maintenance. Il constitue un outil précieux dans le processus de certification, car sa représentativité renforce la confiance dans les résultats simulés. Il est également utilisé dans les domaines de la **formation** et de la communication, où ses représentations en trois dimensions permettent de visualiser clairement les composantes et les dynamiques du système. Intégré à un planning prévisionnel, il facilite le suivi de projet en liant acti-

vités et composants physiques. Ainsi, un certain nombre de vérifications fastidieuses peuvent être effectuées automatiquement, et la production de masse améliorée. Enfin, les données issues de capteurs du système peuvent être injectées dans le jumeau numérique pour l'archivage, à partir duquel ce jumeau numérique sera en mesure d'analyser le comportement du système.

Le jumeau numérique, gourmand d'intelligences

L'intelligence artificielle renforce encore les capacités du jumeau numérique. Grâce au machine learning, il peut ajuster ses modèles à partir de jeux de données, qu'ils soient réels ou générés artificiellement. Cependant, il est indispensable de disposer de milliers de cas à analyser manuellement pour pouvoir donner à l'algorithme d'intelligence artificielle les informations nécessaires pour faire son apprentissage. Il devient alors possible d'explorer des situations rares ou critiques, d'anticiper les comportements du système dans des conditions extrêmes, et de compenser l'absence de données réelles **par la simulation**. Par ailleurs, le jumeau numérique doit être conçu pour être manipulable et compréhensible par l'humain.

La relation entre l'humain et le jumeau numérique est en effet essentielle. L'utilisateur doit pouvoir interagir facilement avec l'outil, qu'il s'agisse de visualiser les données, de tester des hypothèses ou de s'immerger dans des environnements simulés, via la réalité virtuelle avec une représentation 3D du système, pour mieux comprendre des situations complexes.

En définitive, le jumeau numérique ne vise pas à remplacer les experts, mais à les assister dans leurs prises de décision. En rendant les systèmes complexes plus accessibles, intelligibles et prévisibles, il s'impose comme un levier stratégique pour l'innovation, la gestion et l'optimisation des systèmes, à l'intersection du monde réel et du monde virtuel.

Exclusif ! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 7 août 2025 !

« Jumeau numérique et réalité virtuelle pour la modélisa-

tion de systèmes complexes », par Pierre-Antoine BEAL, Cyril SEPTSEAUT, Matthieu AUBRY, Lise LORENZATO, Pierre-Armand THOMAS

24/07/2025

« LE JUMEAU NUMÉRIQUE DU VIVANT EST UN OBJET DE RECHERCHE AVANT TOUT »

À l'heure où les jumeaux numériques s'imposent dans l'industrie comme outils d'optimisation, de prédiction et de pilotage, une question émerge : est-il possible d'en créer un pour le vivant ?

INRAE explore cette piste à travers Artemis, un réseau de recherche interdisciplinaire financé par le **métaprogramme DIGIT BIO**, un programme interne de l'institut, qui vise à soutenir des recherches interdisciplinaires à l'interface entre sciences du vivant et sciences formelles, afin de mieux comprendre et intervenir sur le comportement de systèmes biologiques.

L'objectif d'Artemis est de réunir modélisateurs et microbiologistes pour poser les bases d'un jumeau numérique dédié aux systèmes vivants, en particulier microbiens. Simon Labarthe, chercheur de l'UMR Biogeco, qui porte ce projet, a détaillé pour les Techniques de l'Ingénieur les objectifs, les enjeux scientifiques et les défis techniques de cette initiative.

Techniques de l'Ingénieur : Qu'est-ce que le programme Artemis, et quel est son lien avec le métaprogramme DIGIT BIO ?

Simon Labarthe : Artemis est avant tout un réseau de recherche, porté par INRAE et financé par le métaprogramme DIGIT BIO. Il vise à rassembler des communautés disciplinaires très diverses - écologues microbiens, spécialistes en santé des plantes ou animale, de la fermentation, ou encore modélisateurs - afin de réfléchir ensemble à ce que peut signifier un **jumeau numérique du vivant**. L'idée est de définir comment un tel concept peut être développé en s'appuyant sur des **réalités biologiques et des besoins de la recherche**, et de montrer que ce concept n'est pas forcément limité au domaine de l'industrie ou réduit à des technologies comme le deep learning.

ment limité au domaine de l'industrie ou réduit à des technologies comme le deep learning.

Quelle définition donnez-vous au jumeau numérique dans ce contexte ?

Nous sommes partis de la définition industrielle classique, à savoir « un système qui reçoit en continu des données d'un objet réel, les traite via un modèle, puis émet des actions ou recommandations en retour ». Mais nous avons adapté ce schéma au vivant, en intégrant la complexité biologique, la lenteur de certaines données (comme les données omiques), et la variabilité des systèmes. Nous avons aussi élargi la définition en distinguant trois types de boucles : en ligne (temps réel), à la demande (avec temps d'analyse), et hors ligne (pour guider la conception expérimentale). Cela permet de rendre compte de différents niveaux d'usage et d'intégration du modèle.

Un cas emblématique concerne la recherche de consortiums microbiens capables de protéger les plantes contre certains pathogènes. Aujourd'hui, on peut isoler des dizaines de micro-organismes, mais les tester tous en laboratoire serait impossible : le nombre de combinaisons possibles est colossal. Grâce à la modélisation, on peut construire un jumeau numérique qui explore ces combinaisons *in silico*, identifie les plus prometteuses, et ainsi guide les expérimentations réelles. Ici, le jumeau numérique ne pilote pas un système en temps réel, mais il accélère la recherche en réduisant le champ des possibles.

Il y en a trois : d'abord la production et l'exploitation des données, notamment omiques, qui sont riches mais longues à

obtenir. Ensuite, la modélisation, avec des défis immenses autour de l'intégration des données multi-omiques, de l'assimilation continue de données, et de la prédiction des interactions au sein des communautés microbiennes. Enfin, le pilotage des systèmes microbiens, qui reste encore peu exploré : comment orienter un consortium vivant ? Quels leviers sont efficaces ? Température, nutriments, introduction de nouvelles souches... toutes ces questions font encore l'objet de recherches.

Absolument, et c'est même central. Les communautés microbiennes sont structurées par des interactions trophiques, des échanges de métabolites, de la compétition, de la coopération, que l'on commence à modéliser.

Mais au-delà, il y a d'autres types d'interactions : production de biocides, structures spatiales, biofilms... On essaie de capturer une partie de cette complexité dans des modèles simplifiés. Dans certains cas, le jumeau numérique peut même être un consortium biologique minimal qu'on étudie pour mieux comprendre des dynamiques plus globales.

Oui, et c'est un aspect original du projet. Dès le deuxième atelier, nous avons intégré des philosophes des sciences au consortium. Leur regard nous pousse à questionner ces approches : jusqu'où peut-on modéliser le vivant ? Quelle est la place de l'humain dans la boucle ? Le jumeau numérique peut-il être utile sans devenir une boîte noire magique à laquelle on délègue les décisions ? Cette collaboration nourrit une réflexion sur les limites de la **simulation** et sur la manière dont on souhaite construire ces outils, sans tomber dans le techno-solutionnisme.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

22/07/2025

A QUAND LE JUMEAU NUMÉRIQUE D'UN SYSTÈME VIVANT ?

L'utilisation du jumeau numérique se généralise dans de nombreux secteurs industriels avec succès. Qu'en est-il pour les systèmes vivants, dont l'imprévisibilité rend compliqué le développement de systèmes de simulation fiables ?

La **simulation numérique** permet à de nombreux secteurs industriels de gagner du temps et de l'argent, en limitant les tests réels au maximum, très onéreux. Les exemples sont légions. Les logiciels de simulation pour étudier les propriétés physiques des matériaux composant une pièce mécanique, et leur résistance aux contraintes mécaniques qui leurs seront appliquées lors de leur cycle de vie, sont aujourd'hui utilisés de manière très large. Pour aller plus loin, l'industrie généralise depuis quelques années les jumeaux numériques. Le but étant d'avoir une copie numérique d'un objet physique, afin de lui appliquer les mouvements, formes et interactions que l'objet va subir dans la réalité. Les applications sont très nombreuses : contrôle qualité, productivité, traçabilité, analyse du cycle de vie... pour tous les produits sortant des usines de fabrication, **mais aussi pour les usines elles-mêmes**. En effet, les infrastructures de production - de produits, d'énergie - ont également le droit à leur jumeau numérique, avec de nombreux gains à la clé : maintenance prédictive, augmentation de la productivité, agilité, entre autres.

Les jumeaux numériques développés pour l'industrie ont en commun de se baser sur la simulation et la numérisation de systèmes connus et stables. C'est ce qui les différencie des systèmes vivants, que l'on va retrouver dans les secteurs d'activité comme l'agriculture, la santé, le climat, les **écosystèmes**, entre autres, et qui ont en commun une complexité élevée, une forte variabilité, et une part d'imprévisibilité qui rend la modélisation particulièrement exigeante. Et les applications potentielles très prometteuses.

Un jumeau numérique d'un système vivant : pour quelles applications ?

Dans le domaine de la santé, les efforts pour développer un jumeau numérique du patient illustrent bien cette tension entre ambition technologique et complexité biologique. Des **modèles de cœur virtuel** permettent déjà de tester des dispositifs médicaux, tandis que des **simulations de tumeurs** cherchent à prédire la réponse à des traitements.

La chirurgie, elle, explore des représentations numériques préopératoires personnalisées pour optimiser les gestes médicaux. Mais ces avancées restent fragmentaires, car elles reposent sur l'intégration de données massives, hétérogènes et souvent incomplètes : les données génomiques, les historiques cliniques, l'imagerie médicale, les données environnementales... Autant de couches d'information qu'il faut synchroniser dans un modèle cohérent, ce qui se révèle d'une complexité infinie.

L'agriculture, de son côté, semble offrir un terrain plus structuré pour le développement de jumeaux numériques, notamment à travers l'agriculture de précision. En modélisant les interactions entre sol, cultures et climat local, il devient possible d'ajuster l'irrigation, de limiter les intrants, ou encore d'anticiper les maladies. Cependant, la variabilité biotique, géographique et climatique complique la reproductibilité des modèles. La standardisation des données reste embryonnaire à l'heure actuelle, et les modèles sont encore trop sensibles aux incertitudes locales pour être généralisables à grande échelle.

Face à ces défis, les approches traditionnelles de modélisation, fondées uniquement sur des équations mécanistes, montrent leurs limites. Pour représenter le vivant, il devient nécessaire d'hybrider les méthodes : combiner **intelligence artificielle** et modèles mécanistes, mais aussi articuler simulation multi-agents et apprentissage fédéré, et intégrer des

données empiriques sans perdre de vue les dynamiques structurelles. C'est à ce prix qu'un jumeau numérique peut espérer devenir un système adaptatif, capable de refléter les transformations continues d'un organisme, d'une population, voire d'un environnement.

Ainsi, le jumeau numérique du vivant ne sera pas prédictif au sens classique du terme. Il ne fournira pas de certitudes, mais des probabilités, des tendances, des scénarios dynamiques. Il ne remplacera pas l'expérimentation *in vivo*, mais deviendra un partenaire dans l'exploration des possibles. À condition toutefois de construire des infrastructures de données robustes, d'encourager la collaboration entre disciplines, et d'accepter que dans le monde du vivant, la simulation n'est jamais une réplique parfaite, mais une hypothèse éclairée sur ce qui pourrait advenir.

21/07/2025

LES THÈSES DU MOIS : "LE JUMEAU NUMÉRIQUE, OUTIL STRATÉGIQUE POUR L'INDUSTRIE ET NOUVEAU FRONT POUR LA CYBERSÉCURITÉ"

Pour vous accompagner et vous fournir une information toujours plus riche, Techniques de l'Ingénieur s'associe au Réseau National des Ecoles Doctorales - Sciences Pour l'Ingénieur (REDOC SPI). Chaque mois, notre partenaire sélectionne des thèses en lien avec notre dossier mensuel afin de vous permettre de creuser plus loin les thématiques développées dans le dossier.

Pour notre dossier de septembre, "Le CCUS, une nécessité industrielle en quête d'un modèle économique", voici les thèses sélectionnées par le REDOC SPI. Retrouvez le résumé de ces thèses ainsi que les thèses des mois précédents sur le site de notre partenaire.

Reconfiguration de la commande résiliente aux cyberattaques des CPS par Jumeau Numérique et les techniques des SED Projet de thèse Romain Thibert Automatique Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée

Le maintien de la cohérence du jumeau numérique par rapport aux évolutions de son jumeau physique. Oghenemarho Orukele Conception LISPEN

Mise en œuvre de la XR pour le maintien de la cohérence des jumeaux numériques Abdelhadi Lammini Génie industriel : conception et production Sciences pour la conception, l'optimisation et la production

Modélisation d'une plateforme de jumeau numérique pour les villes intelligentes Hamza Ngadi Informatique Laboratoire en sciences et techniques de l'information, de la communication et de la connaissance

Jumeau numérique pour l'orchestration dynamique de systèmes autonomes et embarqués Yining Huang Sciences et technologies de l'information et de la communication LIP6

Systèmes de Jumeau Numérique pour les systèmes de production : Application sur le manufacturing lab Xeniya Pystina Génie industriel DISP - Décision et Information pour les Systèmes de Production

Ingénierie système dirigée par jumeau numérique : cadre formel et opérationnel Mama Diakite Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie cognitive Laboratoire de l'intégration du matériau au système

Utilisation des jumeaux numériques des bâtiments, l'IA et l'IoT pour l'optimisation des services orientés localisation indoor Aurélien Chambon Informatique Laboratoire d'informatique de l'Institut Gaspard Monge

Calibration de modèles de systèmes complexes pour la construction du jumeau numérique du véhicule automobile Clara Carlier Mathématiques appliquées Centre de Recherche en Économie et Statistique

Jumeau numérique du Réseau Électrique Intelligent par la simulation temps réel : méthodologie et applications Thien Phong Tran Génie électrique Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux

MAÎTRISER L'INGÉNIERIE COMPLEXE AVEC LE JUMEAU NUMÉRIQUE

Les systèmes techniques modernes se caractérisent par des interactions multiples et des comportements difficiles à anticiper. Pour guider leur conception, leur exploitation et leurs évolutions, la simulation numérique et son prolongement qu'est le jumeau numérique offrent une manière nouvelle d'en appréhender la complexité. En associant modèles, données et expertise humaine, ils transforment l'ingénierie en un processus continu, prédictif et collaboratif.

Un extrait de « [Jumeau numérique et réalité virtuelle pour la modélisation de systèmes complexes](#) », par Pierre-Antoine BEAL, Cyril SEPTSEAUT, Matthieu AUBRY, Lise LORENZATO, Pierre-Armand THOMAS

Les systèmes d'ingénierie contemporains sont qualifiés de complexes en raison de leur structure hétérogène et de leur dynamique non linéaire. Ils rassemblent des phénomènes variés qui interagissent entre eux et créent des comportements émergents impossibles à déduire des seuls composants élémentaires. Comprendre ces systèmes exige d'aller au-delà d'une analyse fragmentée, puisque l'observation isolée des parties ne suffit pas à prédire l'évolution de l'ensemble. Leur modélisation demande ainsi d'identifier des niveaux hiérarchiques, de relier des sous-systèmes et d'intégrer la variabilité de leur fonctionnement tout au long de leur vie.

Dans ce contexte, la **simulation numérique** joue un rôle décisif. Elle permet de reproduire le comportement d'un système existant ou d'explorer les performances d'un système encore à concevoir. Elle sert à tester des scénarios extrêmes difficilement accessibles dans la réalité, à réduire les coûts d'expérimentation et à anticiper les effets de modifications techniques. Chaque modèle repose toutefois sur un domaine de validité déterminé par les hypothèses retenues, les données disponibles et les phénomènes repré-

sentés. Ce cadre doit être compris pour éviter des interprétations erronées des résultats.

La modélisation, elle, ne peut être menée par une seule discipline. Les systèmes peuvent réunir celles de la mécanique, du thermique, de l'automatisation, des matériaux, de l'économie ou relevant de l'organisation. La coconstruction devient indispensable pour fédérer ces connaissances, faire dialoguer les spécialistes et intégrer leurs modèles au sein d'un même ensemble cohérent. Cette démarche collaborative garantit que les phénomènes, même éloignés ou interdépendants, soient pris en compte dans la représentation globale du système.

Un prolongement vivant de la simulation

Le jumeau numérique s'inscrit comme une évolution naturelle de la simulation. Il se présente comme une réplique numérique d'un système physique, dont il suit l'évolution dans le temps grâce à l'intégration des données issues du réel. Contrairement à un modèle statique, il retrace l'historique du système, décrit son état présent et anticipe son comportement futur. Il agrège l'ensemble des connaissances, modèles et informations disponibles et les met à jour au fil du cycle de vie. Il représente ainsi une plate-forme unifiée permettant de comprendre, prédire et optimiser un **système complexe**.

Les apports du jumeau numérique sont multiples. Il renforce la représentativité du système en intégrant plusieurs échelles, plusieurs disciplines et une grande variété de conditions environnementales. Il facilite la compréhension en rendant explicables les comportements simulés et en permettant d'interroger les mécanismes internes du modèle. Il crée un espace de travail partagé où experts, concepteurs, opérateurs et décideurs peuvent examiner le même système virtuel et confronter leurs analyses. Il contribue aussi à ouvrir les silos organisationnels, en rendant visibles les interactions entre domaines et en permettant de

les évaluer collectivement.

Cette interaction entre modèles et données n'a pas vocation à remplacer l'expertise humaine. Elle la complète en offrant une vision élargie, structurée et dynamique du système, de ses contraintes et de ses leviers d'optimisation. Elle permet également d'intégrer des aspects non techniques comme les coûts, les délais ou les stratégies d'exploitation, afin de soutenir des arbitrages éclairés dès les premières phases d'un projet.

Un outil transversal pour décider, planifier, certifier et former

L'un des atouts majeurs du jumeau numérique réside dans la diversité de ses usages. Il accompagne la décision en simulant des scénarios variés, en comparant des solutions ou en évaluant les effets d'une modification structurelle. Il soutient la planification en croisant modèles, contraintes et ressources, permettant de vérifier automatiquement la cohérence d'un enchaînement d'opérations ou d'optimiser un planning. Il participe à la certification en offrant un cadre multidisciplinaire capable de représenter un système dans un grand nombre de conditions tout en automatisant certaines vérifications nécessaires.

Il devient également un outil de communication puissant grâce à la visualisation 3D ou à **la réalité virtuelle**, qui permettent d'expliquer facilement des systèmes complexes à des interlocuteurs non spécialistes. Il sert encore de support d'apprentissage, en permettant de simuler des situations critiques sans danger pour les opérateurs. Lorsqu'il est alimenté par les données capteurs, il intervient en temps réel dans le suivi du système, la détection des dégradations et l'amélioration de la maintenance prédictive. La comparaison entre les données mesurées et les données simulées permet ainsi de repérer des écarts, des dérives ou des signaux faibles annonciateurs d'un dysfonctionnement.

En définitive, le jumeau numérique est une mémoire vivante du système. Il capitalise toutes les données issues de la conception, de l'exploitation et de la maintenance. Il s'adapte aux évolutions techniques, aux retours d'expérience et aux nouvelles connaissances. Cette continuité enrichit le modèle, améliore sa précision et renforce sa

valeur pour les décisions futures.

Les limites à ne pas négliger

Le jumeau numérique présente cependant des limites qui tiennent autant à la nature des modèles qu'aux conditions de leur utilisation. Il ne peut jamais reproduire totalement la réalité, car il s'appuie sur des hypothèses, un domaine de validité et des simplifications qui peuvent conduire à une surconfiance si elles sont mal comprises. Sa fiabilité dépend directement de la qualité des données qui l'alimentent, ce qui expose le système à des dérives lorsque ces données sont incomplètes, bruitées ou imprécises.

Sa conception et sa maintenance exigent par ailleurs un niveau d'expertise élevé, une architecture complexe et un investissement important, ce qui peut freiner son déploiement ou entraîner des choix sous-optimaux. Même s'il doit être explicable, il peut parfois fonctionner comme une boîte noire, surtout lorsque des modèles avancés ou des techniques d'intelligence artificielle sont mobilisés, rendant l'interprétation des résultats délicate sans l'appui d'experts.

La connexion permanente entre système réel et modèle virtuel soulève aussi des enjeux de cybersécurité, car la manipulation des données ou l'accès non autorisé aux modèles peut fragiliser l'ensemble. Enfin, un jumeau numérique mal conçu peut renforcer les cloisonnements internes en raison de formats propriétaires ou d'un manque d'interopérabilité, générer des erreurs dans la détection des signaux faibles, produire une surcharge d'informations et conduire à des décisions hâtives ou mal fondées. Ces risques n'annulent en rien son intérêt, mais rappellent qu'il doit être conçu, gouverné et interprété avec rigueur.

Exclusif ! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 1er janvier 2026 !

Jumeau numérique et réalité virtuelle pour la modélisation de systèmes complexes, par Pierre-Antoine BEAL, Cyril SEPTSEULT, Matthieu AUBRY, Lise LORENZATO, Pierre-Armand THOMAS

LE JUMEAU NUMÉRIQUE, CATALYSEUR D'INNOVATIONS

SAMP : DU JUMEAU NUMÉRIQUE À LA "RÉALITÉ PARTAGÉE"

Grâce à sa solution brevetée de « Réalité Partagée », la deeptech parisienne Samp ambitionne d'accélérer la transformation de l'industrie à la lumière des trois grands défis auxquels elle fait face aujourd'hui : urgence climatique et environnementale, déficit en ressources humaines, mais aussi cadre réglementaire toujours plus contraint.

Pour y parvenir, c'est le concept même de « jumeau numérique » que Samp a voulu faire évoluer par le biais de sa solution de Réalité Partagée. Grâce aux algorithmes d'intelligence artificielle qu'elle a développés, l'entreprise née il y a quatre ans de la rencontre de Shivani Shah et de Laurent Bourgouin se révèle en effet capable de transformer en l'espace de quelques jours seulement le nuage de points issu de la numérisation 3D d'un site industriel en un modèle tridimensionnel riche de sens, dans lequel chaque organe constitutif de l'installation est précisément localisé et clairement identifié, et ce, automatiquement.

En complément, une technologie de « streaming 3D » également mise au point par la jeune pousse employant aujourd'hui 23 personnes permet de rendre ces informations accessibles au plus grand nombre dans les meilleures conditions possibles, de l'exploitant jusqu'à l'opérateur de terrain, en passant par l'ingénieur en charge des opérations de maintenance et de modernisation.

Alors qu'elle compte déjà plusieurs dizaines de sites utilisant sa solution SaaS en Europe, et espère franchir le seuil de la centaine d'ici peu, Samp prépare une levée de fonds visant à accélérer son développement commercial à l'échelle internationale, mais aussi à accompagner la maturation d'une solution complémentaire actuellement en phase de bêta-test, comme nous le dévoile son CEO et cofondateur, Laurent Bourgouin.

Techniques de l'Ingénieur : Vous êtes cofondateur et

dirigeant de Samp. Quel est le parcours qui vous a amené à vous lancer dans cette aventure entrepreneuriale ?

Laurent Bourgouin : Cela fait presque 20 ans que je travaille dans le domaine de l'industrie de process, principalement dans les secteurs de l'eau et de l'énergie. Je suis, au départ, ingénieur en mécanique, diplômé de l'École Centrale. J'ai fait une thèse en Australie, centrée sur la modélisation 3D de systèmes complexes. J'avais donc, déjà à l'époque, un intérêt pour les systèmes virtuels permettant de préparer des actions à mener dans le monde réel... J'ai ensuite travaillé pendant de nombreuses années dans le domaine de l'inspection-maintenance de sites industriels, puis dans le domaine de l'ingénierie et du design de leur modernisation. Plus récemment, mon parcours a pris un tournant un peu plus « numérique », puisque j'ai travaillé chez l'éditeur de logiciels Dassault Systèmes, en tant que directeur technique en charge des solutions pour la branche Energy, Process & Utilities.

Pendant toutes ces années, j'ai pu constater – tristement – le retard technologique pris par l'industrie lourde. Cela fait plusieurs années, voire plus d'une décennie, que l'on parle de l'**industrie 4.0**... Or, ce concept peine à prendre forme au sein des sites de cette branche.

J'ai moi-même été confronté à de nombreuses situations d'inspection-maintenance et de modernisation dans lesquelles les plans papier étaient encore légion. Des plans très souvent pas à jour, avec tous les problèmes que cela peut poser ! J'ai notamment eu à faire face à un accident industriel mortel directement lié à cela. Cela a naturellement renforcé ma volonté de faire adopter des solutions technologiques plus fiables à ces industries. Les grands acteurs d'alors avaient toutefois du mal à se réinventer. Je

me suis donc dit que cela ne pourrait se faire que par le biais d'une start-up... C'est ainsi que je me suis lancé il y a quatre ans dans l'aventure entrepreneuriale Samp.

Cela a débuté dans le cadre d'un programme d'incubation – **Entrepreneur First** – une sorte de speed-dating entrepreneurial qui m'a permis de rencontrer mon associée et cofondatrice Shivani Shah. Shivani avait quant à elle réalisé une thèse au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), consacrée aux questions de l'intelligence artificielle et du big data. Elle avait donc une connaissance très pointue de ces technologies, sans avoir en revanche d'idée précise de la manière de les mettre à profit pour un usage qui ait du sens.

Nous nous sommes donc rencontrés dans le cadre de ce programme. J'arrivais avec mon besoin industriel et mon envie de faire bouger les choses sans savoir quelle technologie utiliser, et elle détenait la techno sans besoin précis à mettre en face... La rencontre s'est donc révélée fructueuse et c'est ainsi que tout a commencé.

Quelles ont été les principales étapes des travaux de R&D que vous avez menés ?

Comme je l'évoquais, le plus gros enjeu des sites industriels qui **ont besoin de se transformer** – notamment en réponse à l'urgence climatique – consiste à avoir des données à jour. Or, seules les données de terrain garantissent, par essence, d'avoir des informations à jour. C'est pour cela que nous prenons pour point de départ le scan 3D des installations, une technologie qui s'est nettement améliorée et accélérée ces dernières années. Cette matière première, acquise par nos partenaires, nous permet d'avoir entre les mains la réalité du terrain.

Nos travaux de R&D ont ainsi consisté, en premier lieu, à entraîner des modèles d'IA 3D, un peu à l'image de ce que font les voitures autonomes pour détecter les objets dans leur environnement. Nous avons donc engrangé de grandes quantités de données pour entraîner des réseaux de neurones afin qu'ils soient capables, via le machine

learning et des approches géométriques, de donner un sens à ces numérisations 3D. C'est-à-dire de détecter et identifier des éléments tels que des tuyaux, des pompes, des vannes ou encore des réservoirs.

Nous avons par ailleurs réalisé un autre gros travail de R&D sur ce que nous appelons le « Netflix de la 3D industrielle » : un système de streaming 3D qui permet au client d'accéder où qu'il soit au scan 3D de son site industriel, ce de manière fluide malgré une connexion internet souvent déficiente et un matériel qui se limite généralement à de simples ordinateurs prévus pour des tâches de bureautique.

Voilà les deux premiers pans de notre activité de R&D, que nous poursuivons d'ailleurs toujours aujourd'hui. Mais à cela s'ajoute désormais un troisième axe, qui commence à prendre forme, et qui concerne quant à lui la mise en relation des éléments du modèle 3D avec les schémas fonctionnels existants – que l'on nomme P&ID, pour *piping and instrumentation diagram* –, à des fins de comparaison. Ceci nous a amenés à déposer un brevet portant sur cette solution qui permet de mettre au jour les différences entre la réalité du terrain révélée par les scans et le « tel que documenté » de schémas bien souvent pas à jour.

À quelle solution, très concrètement, ces travaux de R&D ont-ils permis de donner naissance ?

Nous parlons d'une solution de « Réalité Partagée ». Cette solution permet d'offrir à tous les acteurs d'un site – exploitants, ingénieurs, responsable santé-sécurité, et même opérateurs finaux – une vision que l'on qualifie de « 1D-2D-3D » : 3D pour l'accès au scan lui-même, 2D pour les schémas et plans, 1D pour la décomposition en listes arborescentes des équipements.

Pour faire le lien entre ces trois aspects, notre solution part d'un nuage de points, d'une part, et d'autre part des données du système d'information du site auquel nous nous connectons pour y récupérer les fameux schémas, ou « P&ID » que j'évoquais. C'est là que la magie opère !

(Rires) Nos algorithmes viennent découper le nuage de points en objets, puis relier ces tuyaux, vannes et autres pompes, à ceux qui figurent sur les schémas. Le résultat de ce traitement est, in fine, exposé sur le portail web de Réalité Partagée que nous avons développé et qui permet au client d'accéder au **jumeau numérique** de son installation.

Le pari que nous avons fait, et que nous sommes aujourd'hui en mesure de tenir, est de livrer les résultats du traitement du scan 3D d'un site en l'espace de quelques jours seulement, là où des solutions de CAO ou de BIM[1] plus conventionnelles peuvent prendre des mois, voire des années à se mettre en place, avec donc le risque qu'elles ne soient déjà plus à jour au moment de leur mise à disposition du client.

Quels marchés visez-vous ?

Notre cœur de métier concerne pour l'heure l'industrie de process, en particulier l'eau et l'énergie. Or ces sites utilisent tous des équipements de même nature. La taxonomie de ces équipements est donc très bien couverte par notre solution, qui bénéficie d'un très bon taux de reconnaissance, d'autant plus que la qualité des scans que nous recevons est de plus en plus impressionnante ! En outre, les capacités de reconnaissance de nos algorithmes sont bien plus larges et nous permettent donc d'aller vers d'autres marchés tels que les mines, la chimie, la pharma ou la marine qui disposent d'équipements plus spécifiques. Il nous suffit pour cela d'entraîner nos algorithmes sur quelques jeux de données supplémentaires. Notre technologie permet par ailleurs de travailler aussi bien sur des sites en extérieur comme en intérieur.

Quels sont les principaux avantages et intérêts de votre solution pour les acteurs de ces différents marchés ?

Le premier grand intérêt de notre solution est qu'elle permet de réconcilier les acteurs de terrain et l'ingénierie, les « cols bleus » et les « cols blancs ». L'heure est en effet à la modification en continu des sites industriels. Il y a donc un besoin constant de faire travailler ensemble exploitants

et ingénieurs pour avoir des données à jour. Certains de nos clients nomment ainsi notre solution « la pierre de Rosette » ! Elle permet en effet à des gens pratiquant historiquement un langage différent de parler enfin la même langue.

Au-delà de cet aspect fondamental, les grands cas d'usages dans lesquels notre solution révèle ses intérêts sont axés autour de la préparation d'interventions : maintenance, grands travaux... Nous sommes capables d'écourter de plusieurs mois la durée d'un chantier.

Un autre intérêt majeur est celui de la sécurité : comme je le dis souvent, notre objectif est de « faire bon du premier coup », plutôt que d'effectuer de mauvaises manipulations, potentiellement risquées, basées sur des hypothèses erronées, et non pas la réalité du terrain.

Ces intérêts convergent naturellement vers un ultime avantage, de nature économique quant à lui : le prix d'une erreur matérielle, ou de l'indisponibilité d'un site – ne serait-ce que l'espace d'une journée – se comptent en effet en centaines de milliers d'euros.

Enfin, un ultime avantage, notamment dans le cadre de délégations de service public, est celui de la transparence. Les concessionnaires peuvent en effet expliquer à la collectivité comment ils vont travailler, quel est leur plan de maintenance et de gestion patrimoniale du site. Ceci s'illustre notamment au travers de l'expérience de l'un de nos plus importants clients : SUEZ.

SUEZ, avec qui vous avez justement signé un partenariat il y a peu... Quelles perspectives cela ouvre-t-il pour vous ?

SUEZ a fait partie des premiers à croire en notre solution. Nous avons donc mené nos premiers tests avec eux dès 2020, sur une vingtaine de sites, pendant près de deux ans. Il y a quelques semaines, à la fin de l'été, **nous avons effectivement signé un gros contrat avec la direction de SUEZ Eau France** qui va nous permettre de déployer plus largement encore notre solution, potentiellement sur tous les sites SUEZ en France... Outre l'eau, les autres busi-

ness units de SUEZ commencent en effet à s'intéresser à notre solution, notamment pour la valorisation énergétique de déchets, secteur qui fait face aux mêmes problématiques. Notre potentiel d'expansion pourrait d'ailleurs également s'étendre à l'étranger. Nous avons ainsi ouvert il y a quelques mois un bureau au Royaume-Uni, où le domaine des infrastructures d'eau est un énorme sujet. Nous avons déjà beaucoup de demandes. Nous visons également tous les pays limitrophes à la France : Espagne, Italie... Les problèmes liés aux installations vieillissantes sont véritablement internationaux.

Dans le prolongement de notre solution de Réalité Partagée, nous nous apprêtons à sortir un module complémentaire, basé cette fois sur un concept de « Réalité Générée ». Cette brique supplémentaire cible les entités d'ingénierie. Elle va en effet leur permettre de produire des livrables tels que des inventaires ou des fichiers CAO, utilisables ensuite pour préparer, par exemple, les opérations de modernisation d'un site. La solution est pour l'heure disponible en bêta, et nous sentons déjà une forte demande.

[1] *Building information modeling : modélisation des données du bâtiment / de la construction.*

22/11/2023

« DIFFUSER PLUS VITE L'INNOVATION MÉDICALE GRÂCE AU JUMEAU NUMÉRIQUE »

Alors que la médecine entre dans l'ère de la personnalisation, les jumeaux numériques s'annoncent comme une révolution majeure pour les soins, la formation et la recherche notamment.

Porté par Dassault Systèmes et d'autres partenaires comme l'Inria, l'Inserm et de nombreux IHU, le projet **Meditwin** vise à développer des répliques numériques personnalisées du corps humain pour la pratique médicale : des modèles capables de **simuler** le fonctionnement d'un organe, de tester des traitements, voire d'anticiper l'évolution d'une maladie.

Financé dans le cadre de France 2030, ce programme associe chercheurs, médecins, industriels et patients pour bâtir une **plateforme de jumeaux numériques interopérable**, fiable et accessible. Claire Biot, vice-présidente de l'industrie de la santé chez Dassault Systèmes, dévoile pour Techniques de l'Ingénieur les ambitions, les cas d'usage concrets et les défis techniques d'un projet à la frontière du vivant et du numérique.

Techniques de l'Ingénieur : Comment est né le projet Meditwin, et quelle est son ambition principale ?

Claire Biot : Meditwin s'inscrit dans l'ambition de Dassault Systèmes de s'engager dans la santé à grande échelle. Nous partons d'un constat simple : la santé accuse un important retard par rapport à d'autres secteurs industriels en matière de simulation et de prédiction. Là où l'automobile effectue 95 % de ses crash tests en simulation, la formation des médecins repose encore sur le compagnonnage. L'idée du jumeau numérique est donc d'apporter aux professionnels de santé des outils d'aide à la décision, de formation, mais aussi de personnalisation des traitements.

Nous voulons tendre vers une médecine de précision, en permettant de tester des interventions virtuellement avant de les appliquer au patient réel. C'est aussi un outil pour l'innovation thérapeutique et, à terme, pour que les **patients eux-mêmes puissent comprendre le fonctionnement de leur corps** et agir en connaissance de cause.

Quel est le périmètre du projet et qui sont les partenaires impliqués ?

Meditwin est un projet financé par Bpifrance dans le cadre de France 2030. Il a été annoncé par le président de la République en décembre 2023 et se déroule sur six ans, jusqu'en 2029. Dassault Systèmes en est le chef de file, avec un consortium d'acteurs variés : des IHU, le CHU de Nantes, l'Inria, plusieurs start-up, et un "comité patient" impliqué depuis le début. L'objectif est de produire des jumeaux numériques d'organes ou de systèmes métaboliques, utilisables de manière industrielle et interopérable. Nous avons défini 17 cas d'usage répartis sur trois grandes aires thérapeutiques : la cardiologie, la neurologie et l'oncologie. Le projet repose sur huit groupes de travail, allant de la modélisation à la plateforme technique, en passant par l'industrialisation et la validation clinique.

Quels sont les principaux défis techniques pour modéliser le vivant ?

Le vivant est complexe, interconnecté et dynamique.

Pour aborder cette complexité, nous adoptons une approche pragmatique : tout modèle est par essence une simplification, mais il peut déjà être utile s'il permet de poser les bonnes questions. L'idée est de commencer par des modèles isolés, puis de tendre progressivement vers

une approche « système de systèmes ».

C'est la spécialité de Dassault Systèmes : créer des modèles multi-physiques et multi-échelles. Par exemple, avec notre jumeau numérique du cœur, Living Heart, nous avons simulé à la fois le comportement mécanique du muscle cardiaque, la propagation du signal électrique et les dynamiques des fluides sanguins. Nous avons même pu zoomer à l'échelle moléculaire pour modéliser les effets secondaires d'un médicament, comme la cardiotoxicité induite par l'altération de canaux ioniques par exemple.

Quelles technologies sont mobilisées pour construire ces jumeaux numériques ?

Nous combinons plusieurs sources de données : imagerie médicale (IRM, scanner....), électrophysiologie, biologie moléculaire... À partir d'images, nous réalisons de la segmentation pour générer une géométrie 3D, puis nous simulons des propriétés mécaniques, électriques ou biologiques. En neurologie, par exemple, nous superposons des données d'électroencéphalographie profonde à l'imagerie pour comprendre l'épilepsie pharmaco-résistante.

En oncologie, nous modélisons la dynamique de clones tumoraux dans des organoïdes, pour simuler leur réponse à différents traitements selon leurs signatures génétiques. Ce sont des approches très différentes, allant de la mécanique des fluides à la biologie systémique, mais qui doivent cohabiter dans une plateforme unique.

Comment le projet prend-il en compte les enjeux d'éthique, de données et d'usage pour les patients ?

C'est un point crucial. Nous avons mis en place un "comité patient" pour réfléchir aux questions d'éthique, de consentement, d'acceptabilité et d'usage. Un jumeau numérique ne doit pas seulement être techniquement fiable, il doit aussi être compréhensible et utile pour le médecin comme pour le patient. Pour cela, nous nous appuyons sur notre expertise acquise dans les essais cliniques via Medidata, qui implique les patients dès la conception des outils numériques. Sur la question des données, nous militons pour une souveraineté européenne. Ces données sont un bien

commun de santé publique, et doivent être hébergées et traitées dans des infrastructures de confiance.

Quels sont les cas d'usage les plus avancés aujourd'hui ?

En oncologie, nous avons deux projets phares. Le premier consiste à modéliser les organoïdes tumoraux pour prédire quelles combinaisons de traitements seront les plus efficaces en fonction des mutations génétiques. Le second, dans le cancer colorectal, vise à planifier des interventions chirurgicales sur le foie en créant un jumeau numérique de l'organe, pour tester différentes options (résection, ablation) avant de décider en réunion de concertation pluridisciplinaire. L'idée, à terme, est de documenter les meilleures pratiques directement dans le jumeau numérique, pour accélérer leur diffusion, en complément des publications scientifiques classiques.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

23/07/2025

UZUFLY : DES JUMEAUX NUMÉRIQUES À LA PRÉCISION Digne D'UNE HORLOGE SUISSE

Créée fin 2020, la start-up suisse Uzufly a développé une solution de modélisation 3D qu'elle qualifie elle-même de « Google Earth sous stéroïdes ». Les modèles générés par la jeune pousse atteignent en effet une résolution d'un centimètre et demi par pixel. De quoi générer des jumeaux numériques et des rendus photoréalistes particulièrement précis, destinés notamment aux communes désireuses de communiquer plus facilement avec leurs administrés autour de projets d'aménagements.

Après avoir travaillé pendant un peu plus de deux ans au sein de l'un des leaders mondiaux de la technologie de **jumeau numérique**, Romain Kirchhoff s'est associé au diplômé de l'INSA Strasbourg Théo Benazzi pour fonder Uzufly. Plutôt que de simplement transposer en Suisse le modèle de son ex-employeur, Romain Kirchhoff – détenteur d'un master de l'EPFL en management, technologie et entrepreneuriat – s'est efforcé de comprendre les besoins de ses futurs clients (collectivités et autres promoteurs immobiliers). Avec son associé, il a ainsi conçu une offre axée sur un objectif principal : assurer une meilleure communication entre aménageurs et habitants. Uzufly propose pour cela une solution en trois volets : capture d'images aériennes et génération d'un **environnement 3D**, intégration des futures constructions et création d'un rendu photoréaliste généré grâce à des outils issus du monde du jeu vidéo. Romain Kirchhoff, CEO et cofondateur d'Uzufly, nous détaille la genèse et nous dévoile les intérêts de cette solution innovante.

Techniques de l'Ingénieur : Quelle est la genèse d'Uzufly ?

Romain Kirchhoff : J'ai pour ma part commencé mon parcours par un bachelor en génie civil à l'EPFL, suivi par un master en management, technologies et entrepreneuriat. J'avais donc déjà un attrait particulier pour l'innovation. J'ai rejoint ensuite, pour mon projet de fin d'études, un fonds d'investissement axé sur la thématique des drones. Cette expérience m'a amené à la conclusion que hardware et software ne sont pas forcément les aspects les plus importants dans ce domaine, mais qu'il s'agit plutôt de la façon dont les données capturées depuis les airs sont converties en informations utiles pour les clients. J'ai ainsi rejoint une start-up spécialiste des drones basée à Londres, rencontrée par le biais de ce fonds. J'y ai travaillé pendant deux ans et demi. J'ai ensuite décidé de rentrer en Suisse pour tenter de pousser plus loin cette thématique. Un peu naïvement, je pensais au départ dupliquer le business model et proposer des relevés topographiques pour des projets d'infrastructures en Suisse... Quand j'ai présenté cela à une première commune, on m'a répondu que l'on ne comprenait pas le concept ! J'ai ainsi réalisé qu'il fallait avant tout être à l'écoute des besoins des clients avant de formuler des offres. C'est là que j'ai pris conscience du besoin le plus important des communes : celui de mieux communiquer avec les habitants au sujet de futurs projets d'aménagements. C'est alors qu'a débuté ma collaboration avec Théo Benazzi, qui vient de l'INSA Strasbourg, et qui est spécialiste des jumeaux numériques photoréalistes. Nous avons ainsi lancé Uzufly en octobre 2020 et commencé à travailler avec les communes puis, de plus en plus, les promoteurs immobiliers, avec un même objectif en trois étapes : modéliser l'existant depuis les airs, intégrer les futurs bâtiments, puis traiter tout cela grâce à un moteur de rendu de jeux vidéo, comme Unreal Engine. Ceci afin

d'obtenir un rendu le plus réaliste possible, digne d'être présenté au grand public.

Comment votre offre de services s'articule-t-elle ?

Le point de départ est toujours le même : la création d'un jumeau numérique. Nous réalisons l'acquisition des données indifféremment par drone, avion ou hélicoptère – et nous combinons parfois ces modes de prise de vue – afin de créer un socle 3D constituant notre base de travail. Ensuite, nous avons trois offres distinctes. La première concerne la mise à disposition de données techniques pour des logiciels-métier, comme un plan topographique, ou des fichiers 3D. Deuxièmement, une fois que le projet a déjà abouti à un premier aperçu de la volumétrie, nous pouvons intégrer ces premiers designs architecturaux à l'environnement 3D que nous avons créé. Nous mettons alors à disposition de nos clients une plateforme web qui leur permet de consulter et d'utiliser ce jumeau numérique. Il bénéficie d'une résolution de 1,5 cm par pixel – soit près de cinq fois ce que propose Google Earth – et d'une précision absolue inférieure à cinq centimètres...

Enfin, nous pouvons générer des rendus photoréalistes figés, mais aussi les animer en vidéo, puisque nous travails dans un environnement entièrement 3D.

Comment parvenez-vous à modéliser un environnement en 3D à partir de simples photos aériennes ?

Nous mettons en œuvre la technique de **photogrammétrie**. Quiconque dispose d'un drone et d'un logiciel tel que Pix4D peut faire de même. Nous apportons toutefois notre expertise sur des aspects tels que le choix du capteur, de l'optique, de l'architecture de vol, des points de contrôle, du géoréférencement... Toute la partie processing est aussi notre spécialité. C'est la grande force de mon associé Théo, qui a travaillé chez le leader mondial de la modélisation 3D à grande échelle.

Quel est, en moyenne, le temps nécessaire à la réalisation d'un projet ?

En règle générale, nous travaillons sur des zones d'une cinquantaine d'hectares. Cela implique environ une demi-journée d'acquisition. Les traitements prennent ensuite entre deux et cinq jours. Néanmoins, nous prévoyons généralement un délai d'un mois, afin de prendre en compte les éventuels imprévus logistiques, météo, administratifs, etc.

Qu'est-ce qui guide le choix du mode de prise de vue : drone, hélicoptère, avion... ?

L'idée de base de la société est d'être agnostique en matière de plateforme. Si, par exemple, nous avions une grande zone à cartographier, à l'échelle d'un pays, nous privilégierions l'avion. Si le projet concerne plutôt une commune entière, cela se fera plutôt par hélicoptère. Au-delà de 10 km², il est en effet plus rentable d'utiliser un hélicoptère que des drones. Le rendu visuel est aussi meilleur, car le temps d'acquisition est plus court. On a donc moins de variations de luminosité entre chaque image dues aux changements météo.

Combien de projets avez-vous pu mener à bien jusqu'à présent ?

Depuis un peu plus de deux ans, nous avons réalisé environ 70 projets, principalement à destination de promoteurs immobiliers et de communes. Nous avons toutefois aussi d'autres types de projets qui émergent, autour de l'inspection visuelle d'ouvrages d'art, ou encore l'inspection archéologique par exemple. L'un de nos objectifs principaux est de démocratiser l'utilisation des jumeaux numériques par les professionnels.

En quoi ce projet en lien avec l'archéologie va-t-il consister ?

Je ne peux pas encore en dévoiler tous les détails, mais ce projet est issu de l'une de nos collaborations avec des laboratoires de l'EPFL. Dans ce cadre, nous allons travailler avec l'un d'entre eux pour modéliser en 3D un temple égyptien. Cela va servir la recherche archéologique, mais pourrait aussi aboutir à des usages plus grand public, comme une application de terrain en réalité augmentée apportant des informations sur les hiéroglyphes...

Cela va nous demander beaucoup de temps, notamment sur le plan administratif, mais les opérations de terrain devraient débuter en novembre.

Avez-vous éventuellement d'autres perspectives de développement ?

L'un des meilleurs moyens, selon nous, de démocratiser l'utilisation des jumeaux numériques est de mettre à disposition une plateforme commune, accessible à la fois aux architectes, urbanistes et ingénieurs. C'est donc l'un de nos grands axes de développement.

À plus long terme, nous pressentons aussi un intérêt qui devrait aller croissant pour la réalité virtuelle. Même si nous restons, pour l'heure, concentrés sur le développement de nos solutions dédiées à l'urbanisme, nous restons ouverts aux opportunités qui pourraient se présenter sur ce créneau de la VR*.

- VR : *Virtual reality, réalité virtuelle*

09/02/2023



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

L'EXPERTISE TECHNIQUE
& SCIENTIFIQUE DE RÉFÉRENCE

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable !

15 DOMAINES D'EXPERTISE

- ✓ Automatique - Robotique
- ✓ Biomédical - Pharma
- ✓ Construction et travaux publics
- ✓ Électronique - Photonique
- ✓ Energies
- ✓ Environnement - Sécurité
- ✓ Génie industriel
- ✓ Ingénierie des transports
- ✓ Innovation
- ✓ Matériaux
- ✓ Mécanique
- ✓ Mesures - Analyses
- ✓ Procédés chimie - bio - agro
- ✓ Sciences fondamentales
- ✓ Technologies de l'information



Articles de référence
disponibles en français
et en anglais

Détails des offres et sommaires
à retrouver sur le site
www.techniques-ingenieur.fr

Les offres Techniques de l'Ingénieur permettent d'accéder à une **base complète et actualisée d'articles** rédigés par les meilleurs experts et validés par des comités scientifiques, avec :

+ de 10 000 articles de référence et 1 000 fiches pratiques opérationnelles.

3 000 quiz dans + de 1 000 articles interactifs.

+ de 550 bases documentaires, 8 Parcours Pratiques répartis dans plus de 90 offres.

1 280 auteurs contribuent chaque année à enrichir cette ressource.

Service de Questions aux experts.

Les Archives, technologies anciennes et versions antérieures des articles.

+ de 300 000 utilisateurs de techniques-ingenieur.fr chaque mois !

NOS ÉQUIPES SONT
À VOTRE DISPOSITION

Par téléphone
 33 (0)1 53 35 20 20

Par email
 infos.clients@teching.com