

STOP & WORK LE PLAYGROUND
PARIS-SACLAY

Jumeaux numériques pour l'optimisation des opérations industrielles

Jeudi 21 septembre 2023



Coordination scientifique :

Christophe TILMONT (CESAMES)

Bernard MONNIER (MIM)

Daniel VERT (SYSTEMATIC PARIS-REGION)

CESAM
COMMUNITY

MIM Monnier
Innovation
Management

Systematic
Paris Region Deep Tech Ecosystem



TotalEnergies

Renseignements, programme...

<https://www.association-aristote.fr/evenements/seminaire-jumeaux-numeriques-pour-loptimisation-des-operations-industrielles/>

aristote

À la croisée des révolutions numériques



**Compte-rendu du séminaire
du 21 septembre 2023**

**« Jumeaux numériques pour l'optimisation
des opérations industrielles »**

**Stop & Work Le Playground Paris-Saclay
Boulevard Thomas-Gobert,
91120 Palaiseau**

**Coordination scientifique
Par Christophe Tilmont, Bernard Monnier et Daniel Vert.**

Table des matières

1/ Présentation de la journée.....	3
2/ Keynote d'ouverture	3
Séquence 1 : Les besoins industriels	5
1/ Fondations d'une cartographie des usages de jumeaux numériques.....	5
2/ Exemples de besoins industriels : étude de la montée en puissance de l'activité container du Grand Port Maritime de Dunkerque avec WorldLab.....	6
3/ Le jumeau numérique au cœur de l'excellence opérationnelle de SNCF Réseau	8
4/ Modélisation et simulation multi-physique multi-fidélité et multi-échelle pour l'éolien	9
5/ Keynote : Jumeaux numériques pour la résilience et la durabilité des systèmes industriels. Enjeux et perspectives.....	10
Séquence 2: Fondements scientifiques	11
(IA, traitement de données, etc.)	11
1/ Jumeaux numériques systémiques : un outil au service de l'évaluation et de la maîtrise de la complexité	11
2/ Expériences et défis scientifiques des jumeaux numériques	12
3/ Jumeaux numériques et intelligence artificielle appliquée à la chirurgie : l'exemple de Visible Patient	13
Séquence 3 : Exemples de réponses technologiques	15
1/ Le Jumeau numérique pour la mécanique des structures : quels usages et quelles priorités	15
2/ Jumeaux numériques : peut-on franchir le mur de la complexité ?.....	16

1/ Présentation de la journée

L'objectif de cette journée est de dresser un aperçu des principaux enjeux liés aux jumeaux numériques, spécifiquement pour les opérations industrielles (e.g. définition de stratégies optimales d'exploitation et de maintenance d'infrastructures industrielles, optimisation de flux logistiques, minimisation de l'empreinte environnementale d'une entreprise industrielle, etc.) Le recours aux jumeaux numériques peut offrir de nombreux avantages, notamment une efficacité améliorée, une réduction des coûts et une sécurité accrue.

La journée s'articule autour de deux grands axes : les besoins industriels et les solutions scientifiques et techniques. La session du matin est consacrée à l'exploration des différents besoins industriels qui peuvent être satisfaits grâce à l'utilisation de jumeaux numériques. Ces besoins peuvent inclure des stratégies d'exploitation et de maintenance des infrastructures industrielles, d'optimisation des flux logistiques et de minimisation de l'empreinte environnementale d'une entreprise industrielle. Ces questions sont d'une importance cruciale pour de nombreuses entreprises, car elles peuvent avoir un impact significatif sur leur résultat net et sur leur capacité à rester compétitives dans un marché en évolution rapide.

L'après-midi, l'accent est mis sur les solutions scientifiques et techniques disponibles pour répondre à ces besoins industriels. Cela se fait à travers l'exploration des dernières recherches et développements dans le domaine des jumeaux numériques, ainsi que des discussions autour d'applications pratiques et d'études de cas.

L'objectif est de fournir aux participants une compréhension de l'état actuel de la technologie des jumeaux numériques et de la manière dont elle peut être utilisée pour répondre aux besoins spécifiques de leur industrie.

2/ Keynote d'ouverture,

Par Daniel Krob/CESAMES/Systemic Intelligence Group



Daniel Krob est l'un des meilleurs spécialistes mondiaux en modélisation de systèmes complexes. Ancien titulaire de la chaire d'ingénierie des systèmes complexes et ancien professeur de l'Ecole Polytechnique (2001-2019), il préside actuellement le [groupe CESAMES](#), spécialisé en architecture et ingénierie des systèmes, dont fait partie [Systemic Intelligence](#), qui développe une solution originale de jumeau numérique systémique. Daniel Krob est l'auteur de plus d'une centaine d'articles

scientifiques et d'ouvrages. Il a notamment inventé la [méthode CESAM](#) (CESAMES System Architecting Method) d'ingénierie système dirigée par les modèles, qui a été diffusée à plus de 10.000 ingénieurs et déployée sur plus de 2.000 projets de développement de systèmes industriels dans le monde. Il est également *fellow* de l'International Council on Systems Engineering (INCOSE) depuis 2014.

Dans sa keynote d'ouverture, il présente ce qu'est la notion de jumeau numérique systémique ; laquelle permet d'assurer la continuité entre l'ingénierie système dirigée par les modèles et la simulation numérique et prédictive. Pour rendre encore plus concret sa présentation, il s'appuie sur un cas d'études très parlant : celui de [la transformation du port de Dunkerque](#).

C'est en effet tout l'enjeu ici, quand on évoque la question des jumeaux numériques : savoir passer du modèle descriptif d'un système à construire, à un modèle de simulation, qui sera directement et très concrètement utile. Et si Daniel Krob s'intéresse depuis toujours à cette question, il rappelle le rôle qu'à pu avoir, chez lui, l'épisode récent de la pandémie de Covid. Comme tout le monde, il s'est alors retrouvé sans plus grand-chose à faire. Mais, pas comme tout le monde, lui s'est décidé à en faire du temps utile. Pourquoi ne pas chercher à créer un jumeau numérique de l'épidémie pour être capable, ensuite, d'aider à prendre les bonnes décisions ? Le principe sous-jacent ? « *Les infections mettent du temps à se déployer et, finalement, quand on observe quelque chose, c'est qu'il est déjà trop tard pour réagir, car on a trop de retard sur l'épidémie.* » Bref, comment contourner cela ? Par le biais d'un jumeau numérique, évidemment.

Voilà pour l'anecdote. Mais, finalement, quelle que soit la base de réflexion, et son sujet, les questions à se poser sont toujours les mêmes. Et, surtout, le but vers lequel tendre : toujours chercher à traduire ces principes en quelque chose de concret. Et c'est difficile car, en aval, il y a toujours une multitude de petites choses, d'éléments fondateurs du système que l'on veut « dupliquer », à prendre en compte pour avoir une vision holistique. Sans elle, pas de jumeau numérique qui vaille...

Daniel Krob prend ainsi l'exemple d'une chaîne d'assemblage d'avions Airbus, au Canada, dont les directeurs voulaient optimiser le fonctionnement. Ne se focaliser que sur les infrastructures industrielles du site, alors que c'est toute une toile d'araignée d'intervenants multiples qui, en interaction avec lui, le font vivre, ne peut donner aucun résultat probant. Dans ce contexte, vous pouvez optimiser tout ce que vous voudrez sur le site, si vous n'avez pas une approche globale des choses, systémiques (l'évolution du cours euros-dollars par exemple, mais aussi le temps de trajet des composants en cargos depuis les premières usines amont, etc.), alors vous n'arriverez à rien de satisfaisant.

Pour ce qui concerne cet exemple précis du Canada, plusieurs mois d'approches, à décortiquer l'ensemble des process et des systèmes, ont ainsi permis de se rendre compte que le blocage observé provenait d'une décision prise, ailleurs dans le monde, chez un sous-traitant, quelque... dix-huit mois plus tôt.

Tout cela pour dire que se lancer dans l'approche d'un jumeau numérique n'est pas une chose aussi simple que de simplement dupliquer une coquille, un décor. C'est bien une approche holistique qu'il convient d'avoir. Bref, ce n'est pas un « jeu » dans lequel on s'amuserait simplement à faire varier les paramètres pour voir ce que cela pourrait changer.

En revanche, quand ce jumeau numérique est bien pensé, donc bien construit, cela peut *in fine* s'apparenter à cela, c'est vrai. Daniel Krob a ainsi travaillé pour [SNCF réseau](#) sur un jumeau numérique de la ligne Paris-Tours avec, comme feuille de mission, de chercher à déterminer quel pouvait être le meilleur type de signalisation à utiliser pour fluidifier au mieux le trafic. « *En deux secondes, nous pouvons désormais simuler une journée entière de trafic, dans*

différents cas de simulation », insiste Daniel Krob. Même chose au port de Dunkerque (un intervenant reviendra plus en détails sur ce cas particulier, plus tard dans la journée) ou encore pour une mine off-shore (idem).

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de la présentation.](#)

Séquence 1 : Les besoins industriels

1/ Fondations d'une cartographie des usages de jumeaux numériques

Par Pascal Hubert, [AFNeT Services](#)

Pascal Hubert, PhD., a commencé sa carrière en tant que chercheur à Polytechnique de Turin. Il a occupé ensuite le poste d'ingénieur de recherche au laboratoire de planétologie de Grenoble avant de devenir consultant en Innovations chez Assystem puis, successivement, au sein de différentes directions de Safran, il a été chef de projet Électronique et Système, responsable Méthodes et Outils, et responsable d'un Pôle de solutions dédiées à l'ingénierie. Il a ensuite rejoint AFNeT Services en tant que directeur Programmes, se consacrant principalement aux domaines de l'ingénierie systèmes et



des jumeaux numériques du [programme ATLAS](#). Il est maintenant directeur Recherche & Développement au sein d'AFNeT Services.

Les usages des jumeaux numériques se multiplient et se diversifient à tous les secteurs industriels et pour toutes les phases du cycle de vie de l'entité d'intérêt considérée. Cette multitude de points de vue, ainsi que les langages de description différents et les multiples objectifs visés sont nécessaires aux utilisateurs dans leurs objectifs opérationnels quotidiens. Cependant, il est complexe de déterminer les plus-values des jumeaux numériques par rapport à l'usage classique de représentation 3D, de modélisation et de simulation, de système cyber

physique, etc. qui, déjà, apportent des éléments indispensables pour répondre aux exigences d'excellences opérationnelles de systèmes industriels.

D'où, alors, la nécessité de bien savoir de quoi l'on parle avec cette notion de jumeau numérique qui, en réalité, peut revêtir de multiples définitions, suivant les cas. Il s'agit alors, dans cette présentation qui nous est faite, de présenter les fondamentaux d'une cartographie des usages, afin de permettre une meilleure compréhension de la maturité des plus-values de l'usage des jumeaux numériques.

Pascal Hubert évoque ainsi longuement ce qu'est le programme ATLAS. A savoir : un programme sur trois ans, financé pour moitié par les filières industrielles, pour moitié par les pouvoirs publics (BPI), et destiné à fournir les standards numériques multisectoriels servant de socle à la transformation numérique des filières industrielles, à renforcer la souveraineté et à faciliter la transition écologique. Autant de thématiques sur lesquelles les jumeaux numériques peuvent être utiles.

Très concrètement, le système d'ATLAS s'inspire du leitmotiv suivant : « *Jouer collectif, pour gagner ensemble* ». Ainsi se crée un cercle vertueux dont toute l'industrie pourra bénéficier. Exemple : l'entreprise X a un besoin et peut y dédier 100K€. Elle le confronte aux besoins des entreprises B, C et D qui font partie de son secteur d'activité, ont le même besoin et ont, elles aussi, 100K€ à lui consacrer. Les équipes d'experts d'ATLAS leur permettent alors de mieux définir ce besoin et de trouver, si nécessaire, d'autres secteurs d'activité confrontés au même sujet afin d'en faire un « projet ATLAS ».

Une fois le projet défini, ATLAS a la capacité non seulement de l'intégrer rapidement à sa feuille de route, mais également de doubler la « mise de départ » grâce à l'argent des pouvoirs publics. Ainsi, si les entreprises avaient 100 K€ chacune à investir, elles bénéficient de 400 K€ supplémentaires et donc d'un budget total de 800 K€, d'une équipe de travail dédiée et de l'accompagnement d'ATLAS.

Dans ce contexte, savoir bien cartographier les choses avant de se lancer est évidemment d'une grande aide. En clair : savoir se poser les bonnes questions... et y apporter les bonnes réponses. C'est tout cela que Pascal Hubert aborde durant son intervention.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de la présentation.](#)

2/ Exemples de besoins industriels : étude de la montée en puissance de l'activité container du Grand Port Maritime de Dunkerque avec WorldLab

Par Augustin Curlier/[Systemic Intelligence](#)



Augustin Curlier est le directeur des projets de Systemic Intelligence, start-up développant [WorldLab](#) – une solution permettant de produire des jumeaux numériques systémiques à partir d’une spécification de haut niveau conçue dans un langage de modélisation formel. Ingénieur Arts et Métiers ParisTech et GeorgiaTech, Augustin Curlier possède une expérience de plus de dix ans dans le développement et l’architecture de systèmes industriels complexes et innovants (Safran, Thales, [CESAMES](#)). Il est, par ailleurs, l’auteur d’une trentaine de brevets d’invention.

Le [Grand Port Maritime de Dunkerque \(GPMD\)](#) est le 9^e port du range nord-

européen et le 3^e port français. Il s’illustre sur de nombreux segments : 1^{er} port d’importation de fruits et légumes en containers, 1^{er} port français d’importation de minerais et de charbon, 1^{er} port ferroviaire français, 3^e port céréalier français, etc. Pour faire face à la forte montée en puissance de ses activités containers prévue dans les dix prochaines années, le GPMD s’est doté d’un plan ambitieux de renforcement de ses installations portuaires et logistiques.

La mission confiée à Systemic Intelligence, dans ce contexte, était de réaliser un prototype de jumeau numérique systémique permettant d’aider le GPMD à évaluer la cohérence des projets industriels de ce plan avec les prévisions de croissance du trafic ainsi que leurs impacts sociaux-économiques et environnementaux.

Dans son intervention, Augustin Curlier revient sur les grandes étapes de cette collaboration : de la caractérisation du problème à résoudre jusqu’à la présentation de quelques cas d’études. Comment, donc, accompagner la croissance des activités du GPMD ? Comment les infrastructures actuelles réagiront-elles à ce flux accru de containers prévu ? Comment grandir, construire, faire évoluer l’organisation du port de manière optimale et, surtout, en prenant en compte ses effets sur son environnement ? Comment l’écosystème, tout autour, réagira-t-il ? Quel impact environnemental, économique, social, etc. si l’on bouge la moindre ligne d’organisation ?

L’approche d’un jumeau numérique, via WorldLab ici en l’occurrence, est d’une grande aide pour prévoir et donner les grandes lignes à suivre. Œuvrer via un jumeau numérique savamment construit permet en effet d’observer les évolutions à venir, dans telle ou telle configuration : est-ce que je crée des goulets d’étranglement, des encombrements particuliers ? Si oui, quand, où, et à partir de quand ? Est-ce que le plan de maintenance actuel est pérenne ou doit-il être revu ? Si oui, comment, etc. ? Autant de réponse que l’on acquiert ici.

Très concrètement, l’approche WorldLab a permis de déterminer qu’il ne servait à rien de prévoir trop de nouveaux portiques de déchargements... si l’on n’augmentait pas concomitamment la flotte de robots déchargeurs. C’est tout bête, mais encore fallait-il y penser. Et le cerveau humain, lui, est ainsi fait qu’il a tendance à ne se concentrer que sur une tâche, un élément du problème, et pas son ensemble. D’où l’aide, primordiale et nécessaire, que peuvent apporter des jumeaux numériques.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de présentation.](#)

3/ Le jumeau numérique au cœur de l'excellence opérationnelle de SNCF Réseau

Par **Flavien Viguiet** et **Bruno Landès**/[SNCF Réseau](#)

Flavien Viguiet est ingénieur géomètre topographe. Il a intégré le groupe SNCF en 2006 afin d'explorer puis de déployer les outils et méthodes de mesures 3D (LiDAR, photogrammétrie) pour les besoins des projets, de l'exploitation et de la maintenance du réseau ferré national. En 2012, il se lance dans l'étude de l'utilisation des drones pour SNCF Réseau et cofonde Altametriz (filiale détenue à 100% par SNCF Réseau) en 2017. En 2022, il intègre la direction générale Industrielle et Ingénierie de SNCF Réseau où il prend en charge un service qui développe des outils de data-science (lois de vieillissement, deep learning et machine learning) ou d'analyses 3D au service du mainteneur. Dans ce nouveau poste il assure également le rôle de copilote du déploiement du jumeau numérique pour SNCF Réseau. Membre du réseau des experts scientifique et technique SNCF Synapses depuis près de dix ans, il est également rédacteur en chef adjoint de la [revue XYZ](#) publiée par [l'Association Francophone de Topographie](#).



Bruno Landès, de son côté, est docteur en Géologie. Il a intégré le groupe SNCF en 1998 pour assurer les études et le suivi des travaux des lignes à grande vitesse sur le réseau ferré national. En 2007, il prend en charge le service de topographie où il impulse le développement des outils et méthodes de mesures 3D pour les besoins des projets, de la maintenance et de l'exploitation du réseau ferré français. En 2018, il pose les premières bases du concept de jumeau numérique pour SNCF Réseau, pour ensuite assurer le copilotage du déploiement industriel de services jumeau numérique au service de l'ensemble des acteurs du système ferroviaire.

Le jumeau numérique contribue déjà à la performance de SNCF Réseau. Bien au-delà de

la constitution d'un avatar 3D du réseau ferroviaire, il propose un ensemble d'outils digitaux et de services qui permettent de connaître l'état actuel du réseau, d'en optimiser les opérations et de piloter les investissements futurs. Il permet des « sauts de performances » pour maintenir un haut niveau d'excellence opérationnelle tout en rationalisant les dépenses associées.

Le jumeau numérique couvre la totalité du cycle de vie du système, dans le passé, dans le présent et dans le futur. L'intérêt ? Majeur. Il s'agit, tout bonnement, d'accompagner l'entreprise dans son objectif de doublement de la part modale du train d'ici 2030, donc du trafic de fret et de personnes. Pour cela, il faut se donner tous les moyens pour disposer de la meilleure connaissance possible du réseau, tant sur la maintenance, que sur l'exploitation, ou encore anticiper les renouvellements, maximiser l'exploitation commerciale, etc. Finalement, le jumeau numérique doit aider à rendre des choses complexes simples. Et c'est aussi cela la définition que l'on pourrait apporter à cette notion de jumeau numérique.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de présentation.](#)

4/ Modélisation et simulation multi-physique multi-fidélité et multi-échelle pour l'éolien

Par **Tristan de Lataillade**/[TotalEnergies](#)

Tristan de Lataillade a travaillé dans le domaine de la modélisation numérique et de l'énergie renouvelable pendant un peu plus de dix ans. Après un MSc suivi d'une expérience de recherche portant sur l'énergie marine à City University of Hong Kong, il a poursuivi une thèse de doctorat (EngD) à The University of Edinburgh sur l'interaction fluide-structure appliquée aux énergies renouvelables offshore. Il a par la suite continué à travailler dans le domaine de la mécanique des fluides numériques et du développement logiciel scientifique, notamment à HR Wallingford et à l'U.S. Army ERDC (Engineer Research and Development Center). Depuis janvier



2022, il a rejoint TotalEnergies OneTech R&D en tant que chercheur dans la plateforme numérique pour la simulation de systèmes éoliens onshore, offshore, et flottants.

Les ambitieux objectifs de production d'énergie renouvelable poussent l'industrie à considérer des éoliennes plus grandes (au-delà de 15MW par turbine), à se tourner vers des eaux plus profondes (et donc vers des systèmes flottants), et à densifier les parcs. Ces changements entraînent de nouvelles questions sur la conception des systèmes, leur comportement sous différents types de contraintes environnementales, ou encore l'usure de leurs composants.

Le jumeau numérique doit être capable de prendre en compte de nombreux phénomènes (multi-physique), permettre d'adapter la précision avec laquelle ces phénomènes physiques sont

représentés (multi-fidélité), et pouvoir représenter une turbine seule jusqu'à plusieurs fermes éoliennes en interactions (multi-échelle).

Dans sa présentation, Tristan de Lataillade décrit ainsi les problématiques et le travail réalisé chez TotalEnergies OneTech R&D pour la modélisation et simulation numérique de systèmes éoliens.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de présentation.](#)

5/ Keynote : Jumeaux numériques pour la résilience et la durabilité des systèmes industriels. Enjeux et perspectives

Par Abdelkrim Doufène/[IRT-System X](#)



Abdelkrim Doufène est le directeur Stratégie et Programmes de l'IRT SystemX. Avant de rejoindre SystemX, il a été chercheur au Massachusetts Institute of Technology (MIT) et ingénieur de recherche au département R&D de Renault. Abdelkrim Doufène est titulaire d'un doctorat en informatique de l'École polytechnique, du programme doctoral en management des entreprises de l'ENPC School of International Management. Il est aussi titulaire d'un master en systèmes d'informations et de décision de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, de l'ESSEC et du

CNAM, et d'un diplôme d'ingénieur en informatique de l'Ecole supérieure d'Informatique.

L'exploitation sécurisée des données des systèmes industriels est au cœur de l'industrie du futur et de l'entreprise étendue. Elle a pour objectif d'accroître l'efficacité opérationnelle des systèmes industriels de toute la chaîne logistique. Il n'existe pas encore de standard pour la collecte de ces données et chaque cas applicatif se dote de son propre cadre, ce qui complique grandement le passage à l'échelle de ce type d'application.

Le jumeau numérique, visant à répliquer numériquement les systèmes industriels, offre une formidable opportunité de faire émerger un standard pour l'interfaçage des données, pilier essentiel pour le déploiement massif de l'industrie du futur. C'est l'ambition affichée par le programme JNI, porté par SystemX, et qui se veut structurant pour l'ensemble des filières industrielles.

Maintenance prédictive, optimisation de la performance, etc. L'idée est alors de savoir proposer un cadre méthodique outillé pour que chacun puisse y trouver son compte.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de présentation.](#)

Séquence 2: Fondements scientifiques (IA, traitement de données, etc.)

1/ Jumeaux numériques systémiques : un outil au service de l'évaluation et de la maîtrise de la complexité

Par Antoine Rauzy/[NTNU](#)



Le professeur Antoine B. Rauzy travaille actuellement à l'Université norvégienne des sciences et technologies (Trondheim, Norvège). Au cours de sa carrière, il a fait des allers-retours entre le monde universitaire et l'industrie, étant notamment chercheur au CNRS, professeur associé des Universités de Bordeaux et de Marseille, professeur à l'Ecole Polytechnique et à Centrale Supélec, PDG de la start-up [ARBoost Technologies](#), directeur du département R&D d'Ingénierie Systèmes chez Dassault Systèmes (premier éditeur de logiciels

français) et directeur scientifique de Systemic Intelligence.

Il a obtenu son doctorat en 1989 et son habilitation à diriger des recherches en 1996, tous deux en informatique. Il travaille sur l'ingénierie de fiabilité depuis plus de trente ans et sur l'ingénierie des systèmes depuis plus de dix ans. Il a publié plus de 200 articles dans des revues et conférences internationales. Il fait partie des conseils consultatifs de plusieurs conférences et revues internationales et est régulièrement invité à animer des séminaires et des conférences. Il a renouvelé les fondements mathématiques et conçu les algorithmes les plus efficaces connus à ce jour pour l'évaluation probabiliste des risques.

Il est également le principal concepteur du [langage AltaRica](#) et a proposé des concepts de pointe pour l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles. Il a développé des logiciels d'évaluation probabilistes des risques qui sont utilisés quotidiennement dans l'industrie et qui sont reconnus comme les meilleurs outils de leur catégorie. Enfin, le professeur Rauzy enseigne les méthodes de programmation avancées, l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles et l'ingénierie de la fiabilité, et il a dirigé de nombreux mémoires de maîtrise, une vingtaine de thèses de doctorat et plusieurs études postdoctorales.

Nos systèmes techniques et sociotechniques sont de plus en plus complexes et font face à des environnements de plus en plus incertains. Les jumeaux numériques systémiques sont un moyen d'évaluer cette complexité et cette incertitude afin de mieux les maîtriser, tant en phase de conception que durant les opérations. Ils s'appuient sur des modélisations comportementales des systèmes et des simulations informatiques permettant de calculer des indicateurs de

performance. Les décideurs peuvent ensuite utiliser ces derniers pour définir les stratégies à mettre en œuvre.

Dans son exposé, le professeur Rauzy revient sur les aspects conceptuels et techniques de ces modélisations comportementales, en s'appuyant en particulier sur la technologie Sigma/WorldLab. Il revient, notamment, sur un cas très concret : celui lié au projet d'exploitation d'une mine sous-marine en Norvège. Avec cette grande question à trancher : est-ce faisable ? Pour y répondre, encore faut-il avoir une approche multidimensionnelle (il ne s'agit, en effet, pas seulement de la capacité d'extraction, mais aussi de savoir combien d'énergie vont être nécessaires, à quel coût, prendre en considération le volet environnemental, la sécurité, etc.).

Dans ce contexte, le jumeau numérique est un formidable outil... à condition de savoir le manier. Il faut trouver le bon niveau d'abstraction et, pour cela, il faut s'entourer de spécialistes parce que modéliser, c'est difficile, c'est un métier. Un métier en voie de construction encore. C'est sur toutes ces questions que le professeur revient. C'est ainsi une nouvelle technologie qui se met en place, en s'appuyant sur des fondations scientifiques très solides, pour ensuite être capables de prendre des décisions dans des environnements de plus en plus incertains et de plus en plus complexes.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de présentation.](#)

2/ Expériences et défis scientifiques des jumeaux numériques

Par Benoit Combemale/[Inria](#)

Benoit Combemale est professeur des Universités en science et ingénierie du logiciel et des systèmes complexes à l'Université de Rennes. Il co-anime l'équipe de recherche DiverSE associée aux laboratoires IRISA et Inria. Il est également chercheur associé dans l'équipe SM@RT du laboratoire IRIT à Toulouse. Benoit Combemale s'intéresse à l'ingénierie dirigée par les modèles de systèmes complexes à des fins de simulation, d'exploration de l'espace de conception, et d'analyse de compromis. Il s'intéresse également à la conception et au développement de langages de modélisation outillés, et à la validation et vérification du logiciel.

Ses travaux s'appliquent plus particulièrement dans les domaines des systèmes cyber-physiques intelligents, de l'Internet des objets, et du calcul scientifique. Benoit Combemale a co-écrit trois livres et plus de 150 publications dans des revues et des conférences



dans les domaines de l'ingénierie du logiciel et des systèmes complexes. Il a également édité deux livres et plusieurs numéros spéciaux dans des revues scientifiques.

Il est rédacteur en chef du journal international [Software and Systems Modeling](#) (SoSyM) publié par Springer-Nature, un des principaux journal scientifique dans le domaine de la modélisation du logiciel et des systèmes. Il est également membre des comités de pilotage des conférences internationale MODELS (sur l'ingénierie dirigée par les modèles), SLE (sur l'ingénierie des langages) et ICT4S (sur le lien entre numérique et soutenabilité).

Benoit Combemale a coordonné et participé à de nombreux projets de recherche collaboratifs, soit directement avec l'industrie soit dans le cadre de projets financés par l'Union européenne ou le gouvernement français. Il est également membre fondateur de l'initiative GEMOC, un effort international hébergé par la fondation open source Eclipse et visant à développer des techniques et environnements pour faciliter la création, l'intégration et le traitement automatisé de langages de modélisation hétérogènes.

Au cœur des technologies numériques de l'industrie du futur, le jumeau numérique, occupe une place centrale, au carrefour des systèmes IoT, de l'analyse de données, de l'IA, de la modélisation et de la simulation, de l'optimisation et de l'automatisation. Les jumeaux numériques font appel à la représentation des données et des modèles, à la manipulation de graphes de connaissances, à la visualisation et à l'algorithmique 3D, à l'acquisition, la préparation et la manipulation de données issues de capteurs et à la consolidation de modèles et de connaissances hétérogènes, à la modélisation et la simulation numériques, à l'intelligence artificielle et à la décision distribuée. Bref, les jumeaux numériques sont des systèmes complexes, à l'interface et synchronisés avec le monde physique. Ils stockent des volumes de données massifs et proposent des interfaces et des services de haut niveau.

Plusieurs équipes d'Inria poursuivent des travaux originaux dans le domaine du jumeau numérique aussi bien au niveau de leur conceptualisation, de l'architecture, la représentation des connaissances, le couplage de modèles, la représentation 3D, la modélisation hybride avec des applications dans l'industrie, dans le bâtiment, en télécommunication ou en santé.

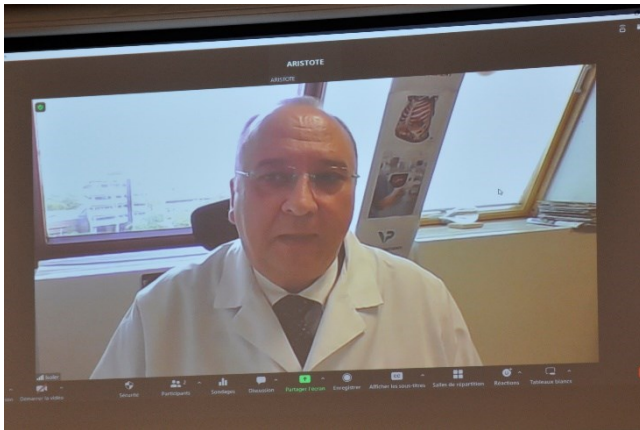
Dans son exposé, Benoit Combemale évoque le concept même de jumeau numérique (quelle définition lui donner ?), puis s'attache à dresser une cartographie des équipes Inria travaillant sur le sujet général du jumeau numérique, et présente des exemples concrets de projets et de start-ups.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de présentation.](#)

3/ Jumeaux numériques et intelligence artificielle appliquée à la chirurgie : l'exemple de Visible Patient

Par Luc Soler/[Visible Patient](#)



Luc Soler est le président de la société Visible Patient depuis 2017, start-up créée en 2013 dont il est l'un des co-fondateurs avec l'IRCAD. De 1999 à 2019 il a été directeur scientifique de l'Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif à Strasbourg (IRCAD). Il est également professeur associé à l'équipe de chirurgie digestive et endocrine des hôpitaux universitaires de Strasbourg depuis 2000.

Depuis décembre 2019, il est également membre de l'Académie nationale de chirurgie. Ses domaines d'expertise sont le traitement d'images médicales, la modélisation 3D, la réalité virtuelle et augmentée, la robotique chirurgicale et l'intelligence artificielle appliquée au médical. Il a remporté de nombreux prix nationaux et internationaux parmi lesquels le Prix Innovation 2018 de l'association Française de Chirurgie, le Prix EY de l'Entrepreneur de l'Année 2018 dans la catégorie Stratégie Disruptive, le Prix Smart Santé du village francophone du CES 2019, le Prix Marius Lavet 2019, le Talent de la E-Santé 2022 dans la catégorie application citoyenne de l'Agence du Numérique en Santé et le Grand Prix Check Up Santé dans la catégorie eSanté de BFM Business (2023).

Au cours des dernières années, les innovations technologiques en informatique ont fait naître de nouveaux espoirs. Le post-traitement par ordinateur des images médicales permet d'obtenir une modélisation 3D (voire 4D) précise des structures anatomiques et pathologiques contenues dans ces images. C'est ce jumeau numérique que fournit le laboratoire d'analyse Visible Patient en utilisant des algorithmes d'Intelligence Artificielle à partir d'images TDM ou IRM, unique solution prise en charge à 100% par de nombreuses mutuelles et assurances santé en France.

Avec le développement des technologies de la réalité virtuelle et de la réalité mixte ou augmentée, ces modélisations 3D de l'anatomo-pathologie des patients peuvent aller encore plus loin dans l'assistance à la compréhension des variations anatomiques présentes chez un patient et dans l'assistance au geste opératoire. Elles offrent d'incroyables bénéfices qui ne sont que le début d'une nouvelle ère de la médecine assistée par ordinateur.

Si son usage permet de sauver des vies, l'utilisation de l'Intelligence Artificielle nécessite la prise de conscience de problèmes éthiques et réglementaires auxquels il est nécessaire de répondre. A la juste peur d'un système totalement autonome et incontrôlable, il est possible d'apporter des solutions et garde-fous permettant d'utiliser ce que l'Intelligence Artificielle peut nous apporter de meilleur, en réduisant au minimum les risques.

Le rêve du chirurgien, explique Luc Soler, est de pouvoir observer le corps du patient de l'intérieur. C'est faisable aujourd'hui, mais avec un énorme ennui : nos yeux humains ne sont pas faits pour repérer tout ce que l'image permet, elle, de voir. Ainsi, nos yeux ne perçoivent péniblement qu'une trentaine de niveaux de gris différents quand une image en recèle environ 2000. Autre problème : celui de la vue en coupe, avec l'humain qui a du mal à imaginer de la 3d à partir de vues 2d. Tout cela pour arriver à ce chiffre, assez terrible, de 92.000 erreurs évitables graves relevées environ chaque année, la plupart dues à de mauvaises interprétations de ces images par des yeux humains.

D'où l'intérêt de sans cesse chercher à améliorer les choses en matière de technologie pour guider l'humain vers un maximum de fiabilité. Créer un numérique du patient permet ainsi de pouvoir définir la thérapie optimale, grâce à la simulation. A la clé, des enjeux de santé

évidemment primordiaux. Et, possiblement, de grandes avancées médicales. Beaucoup d'espoirs, donc.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de présentation \(1/2\)](#)

[Accéder à la vidéo de présentation \(2/2\)](#)

Séquence 3 : Exemples de réponses technologiques

1/ Le Jumeau numérique pour la mécanique des structures : quels usages et quelles priorités

Par Florent Mathieu/[EikoSim](#)



Florent Mathieu est docteur de l'Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, spécialisé dans les techniques expérimentales dans le domaine de la mécanique des structures. Après avoir développé des méthodes de corrélation d'images numériques orientées vers la simulation au cours de ses recherches, il a décidé de créer EikoSim avec son collègue Renaud Gras.

EikoSim vise à combler le fossé entre les essais et la simulation aux différentes échelles de développement en mécanique des structures, sur la base d'une plate-

forme logicielle dédiée appelée EikoTwin.

Le concept de jumeau numérique est au cœur des développements visant à renforcer la prédictivité des modèles en se nourrissant de données du terrain. Comment ce concept peut-il être transféré au domaine de la mécanique des structures, où la confiance dans les modèles joue un rôle clé dans leur remplacement des essais physiques et permettre un développement plus rapide et moins coûteux ? La présentation de Florent Mathieu s'attache à identifier les grands cas d'usages en mécanique des structures, et expliquer la stratégie de développement d'EikoSim en la matière.

La tendance, très clairement, est à remplacer le plus possible les tests physiques, très coûteux, pour les remplacer par de la simulation. Laquelle a, en plus, d'autres avantages que son coût : on peut se projeter dans d'autres situations, à la fois la situation réelle, mais où tout est possible.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de présentation.](#)

2/ Jumeaux numériques : peut-on franchir le mur de la complexité ?

Par Guy de Spiegeleer/[twiinIT](#)



Après avoir consacré plus de vingt-cinq ans de sa carrière à Safran, où il a travaillé sur la conception de moteurs de fusées et d'avions, le développement d'outils, de méthodes et la mise en place de processus innovants, Guy De Spiegeleer a fondé twiinIT en 2022 avec son associé, Adrien Delsalle. Leur objectif est d'accompagner les acteurs de l'industrie aéronautique

dans leur quête d'une aviation plus durable et respectueuse de l'environnement.

Pour ce faire, ils proposent la méthodologie et les outils pour mettre en œuvre un jumeau numérique massivement multidimensionnel, interactif, collaboratif et modulaire. Guy De Spiegeleer est titulaire d'un doctorat en mécanique et d'un diplôme d'ingénieur de l'École Polytechnique.

La mise en œuvre d'un jumeau numérique de système complexe est un défi technique en matière de gestion de la complexité du code. C'est aussi un enjeu de transformation pour se déployer au sein des organisations : comment adresser ces deux défis ? Si ce n'est pas simple – cela se saurait – il y a néanmoins une certitude : le jumeau numérique est l'avenir. D'ici quelques années, il va transformer les process. Avec, finalement, cet immense avantage, celui, pour caricaturer un peu de rendre possible de prévoir... l'imprévisible. Et ce avec tous les avantages à la clé. Car anticiper, c'est se mettre en position de gagner, demain. A condition, encore une fois, de savoir efficacement architecturer son système de simulation.

[Accéder à la ressource.](#)

[Accéder à la vidéo de présentation.](#)