

DÉCIDER AVEC LES SCIENCES



RAPPORT DES ATELIERS



Prix
Décision

JUMEAUX NUMÉRIQUES :
PROMESSES OU MIRAGE ?
PROMOTION ROSALIND FRANKLIN

Cycle national de formation 2021-2022
Mobiliser les ressources pour les transitions transformations,
ruptures, métamorphoses

LES ATELIERS DU CYCLE NATIONAL

Les ateliers sont des travaux conduits dans le cadre du cycle national sur une durée de cinq journées officielles, avec des temps de travail des auditeurs entre les séances. Ils ont pour vocation de conforter les dynamiques de travail collaboratif, de mobiliser l'intelligence collective entre les auditeurs, de permettre une analyse des dynamiques d'acteurs à l'œuvre dans les rapports science-société, d'apprendre à gérer des controverses et chercher des consensus entre acteurs aux intérêts très divergents. Cela nécessite un travail d'investigation mené avec l'aide d'un animateur et la rencontre d'un certain nombre de personnes invitées à la demande des auditeurs, en concertation avec l'animateur afin d'entraîner les auditeurs à effectuer des préconisations pour éclairer la prise de décision.

Les auditeurs ne sont pas spécialistes du sujet. Ils doivent, à l'issue de leurs travaux d'investigation, en effectuer une synthèse, sans prétendre ni à l'exhaustivité, ni à l'expertise. La synthèse doit en revanche dégager les principales problématiques, en choisir quelques-unes à traiter, et proposer des lignes d'actions ou des pistes de solutions possibles, propres à éclairer les décideurs. Le jour de la clôture du cycle, les auditeurs présentent leurs travaux devant un jury, rassemblé par l'IHEST. Une note de cadrage présentant le sujet de l'atelier est remise aux auditeurs au démarrage de travaux (voir Annexes).

Le jury de l'IHEST a attribué à ce travail des auditeurs et auditrices de la promotion Rosalind Franklin, 2021- 2022, le prix "Décision".



Ce rapport a été présenté devant les membres du Conseil économique, social et environnemental le 16 juin 2022.

JUMEAUX NUMÉRIQUES : PROMESSES OU MIRAGES ?

SOMMAIRE

RÉSUMÉ

AUDITRICES ET AUDITEURS DE L'ATELIER

ANIMATION DE L'ATELIER

INTRODUCTION

Le JN dans le contexte des transitions environnementale et sociale

Partie 1- Les JN : réalité, emballement ou mirage ?

1.1 Une réalité industrielle

1.2 A la conquête de tous les secteurs

1.3 Un engouement à nuancer

Partie 2 - Le JN : une ressource au service des transitions environnementale et sociale ?

2.1 Un outil de sobriété et d'optimisation industrielle ?

2.2. Un outil dans la lutte contre le réchauffement climatique ?

2.3. Un outil compatible avec la transition sociale ?

2.4 Continuité ou rupture ?

Partie 3 - Défis et recommandations

3.1 Garantir la protection et l'interopérabilité des données

3.2 Fixer un cadre juridique

3.3 Le rôle irremplaçable de l'humain dans la transition numérique

3.4. Subordonner les moyens à des objectifs raisonnables

ANNEXES

ANNEXE 1 - NOTE DE CADRAGE DE L'ATELIER

ANNEXE 2- ARCHITECTURE DIGITALE D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE

ANNEXE 3 – GLOSSAIRE

ANNEXE 4 - MODÈLE ET MODÉLISATION

ANNEXE 5 - JUMEAUX NUMÉRIQUES URBAINS : LES LIMITES D'UNE MISE EN ÉQUATIONS

JUMEUX NUMÉRIQUES : PHARMAKON DES TRANSITIONS ?

RÉSUMÉ

Le concept de Jumeau Numérique (JN) est invoqué de façon croissante dans l'industrie, la construction, l'aéronautique, l'exploration des océans, l'espace, la santé, la gestion urbaine, etc. A ces usages multiples font écho autant de définitions qui s'appuient de façon plus ou moins aboutie sur les trois éléments structurants requis d'un JN : un système physique, sa modélisation numérique et des données captées sur le système et transmises à la réplique numérique capable, grâce à ses dernières, d'agir en direct sur la réalité modélisée.

Selon les cas, Le JN permet d'optimiser un processus, d'augmenter la productivité d'un fonctionnement industriel, ou encore, il vise aussi à apporter des réponses pour, par exemple, identifier les évolutions de la planète et du climat, décrire un territoire et agir de manière dynamique sur sa gestion... La multiplication des données numériques, le progrès des capacités de calcul, le recours à l'intelligence artificielle, sont autant d'éléments qui semblent accréditer la faisabilité de JN ambitieux.

Un décalage est pourtant constaté entre l'abondance de communications sur les jumeaux numériques dans la presse professionnelle comme dans divers projets institutionnels, et leur place modeste au sein de la littérature académique. Par ailleurs, le JN constitue une part mineure au sein des activités IT (Information Technology) mondiales et, en dehors de l'industrie, peu de JN s'avèrent fonctionnels. Par bien des aspects, le JN ne semble pas, au regard des théories scientifiques mobilisables, constituer un concept original qui renouvelle la façon d'aborder l'utilisation des données en vue de la modélisation du monde.

Par ailleurs, il n'apparaît pas toujours faisable ou souhaitable de réduire la complexité du monde au seul regard orienté par le JN. Les coûts, économiques et énergétiques, de production, de partage et de stockage des données doivent être appréciés à cette aune.

Si l'on apprécie son rôle dans les transitions en particulier écologique et sociale, le JN tient ainsi une place ambiguë, tel un pharmakon (terme désignant le caractère tant de remède que de poison) ; il peut être considéré comme une ressource pour ces transitions mais peut également, dans une certaine mesure, perpétuer, voire aggraver les problèmes environnementaux et sociaux.

Il est donc légitime de se demander si le JN constitue une nouvelle manière de gérer la complexité du monde. Un certain nombre d'enjeux technologiques, économiques, juridiques, sociaux et politiques doivent être identifiés dans le processus de conception et de décision dans lequel s'intègrent les jumeaux numériques.

AUDITRICES ET AUDITEURS DE L'ATELIER

Yannick AUTRET, chargé de mission recherche, transport, énergie et environnement Ministère de la Transition écologique et solidaire

Hélène BREARD directrice, Les Petits Débrouillards Grand Ouest

Philippe CHAMARET, directeur, Institut Ecocitoyen pour la connaissance des pollutions

Xavier DROUET, fondateur, D-FI

Christelle FALCIONI, directrice de cabinet du recteur délégué pour l'enseignement supérieur, la recherche et l'innovation Auvergne Rhône Alpes, Ministère de l'Education nationale, de la Jeunesse et des Sports

Catherine GOURLAY-FRANCÉ, directrice adjointe de l'évaluation des produits réglementés ANSES

Sabine HUG, chargée de programmation, Universcience

Chloé LEMEUNIER, directrice déléguée aux partenariats, en charge du centre numérique d'innovation sociale, Université Paris 8 - Vincennes Saint-Denis

Roland PELLENQ, directeur de recherche, Centre national de la recherche scientifique
Olivier REY, Inspecteur général de l'éducation, du sport et de la recherche IGESR

ANIMATION DE L'ATELIER

Etienne-Armand AMATO, maître de conférences en sciences de l'information et de la communication à l'université Gustave Eiffel

PERSONNALITÉS RENCONTRÉES

Isabelle BENEZETH, coordinatrice interministérielle Copernicus et GEO au Ministère de la recherche et de l'innovation

Destination Earth, projet européen de jumeaux numériques

Clémence ASSIBA GNIMASSOUN, infodocumentaliste et doctorante, SNCF réseau

*Jumeaux numériques et enjeux pour la gestion d'infrastructures, cas d'étude SNCF
DICEN-IDF, SNCF*

Julie JEBEILE, philosophe des sciences. Institute für Philosophie & Oeschger Center for Climate Research, Universität Berné Mologue

Epistémologie des modèles et simulations numériques

Nathalie JULIEN, professeur des universités en électronique - génie informatique à l'Université de Bretagne Sud, affectée en enseignement à l'ENSIBS Lorient et en recherche au laboratoire Lab-STICC

Questions éthiques relatives aux jumeaux numériques : points de vue et perspectives

Zoubeir LAFHAJ, enseignant chercheur Centrale Lille, titulaire de la chaîne de construction 4.0

La notion de jumeau numérique, vecteur d'innovation pour le secteur du BTP

Miryam LE MADEC, responsable outils, méthodes et R et D, Egis Conseil, co-auteurice de l'étude « Miroir, miroir... le jumeau numérique du territoire »

Enjeux d'une mise en miroir du territoire grâce au jumelage numérique

Jean-François LUCAS, sociologue de la ville numérique, consultant-chercheur.

Directeur de projets. Chronos. Chercheur associé au Laboratoire de sociologie urbaine (LaSUR) - École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)

Traditions et imaginaires des jumeaux numériques urbains

Sébastien MASSART, directeur de la Stratégie, Dassault Systèmes

Étendre et améliorer le monde réel par les univers virtuels

Richard MORENO, "Data Terra" Research Infrastructure Technical Director, CNES

Enjeux internationaux de la coopération scientifique autour de la création d'un jumeau numérique de la terre

Laurent NAVARRO, enseignant-chercheur, Ecole des Mines de Saint-Etienne

Innovation en santé par les jumeaux numériques : un cas appliqué

Corentin STALDER, informaticien, chercheur CIFRE chez SNCF réseau

*Jumeaux numériques et enjeux pour la gestion d'infrastructures, cas d'étude SNCF
DICEN-IDF*

INTRODUCTION

La révolution numérique génère continuellement de nouveaux termes et objets qui deviennent des expressions emblématiques : « cloud », « big data », « villes intelligentes », « apprentissage automatique », « intelligence artificielle », « Internet des objets » ont été inventés pour décrire des innovations et applications récentes en matière de calcul et de communication, qui vont avec l'automatisation de la société. Parmi ceux-ci, celui de jumeau numérique (JN) vient compléter le paysage. Ce terme a été inventé au début des années 2000 par M. Grieves (2014) pour l'ingénierie de la production, dans le monde industriel, et s'étend depuis peu à de nouveaux secteurs d'activités. Le JN réunit trois éléments : un modèle physique (objet, système ou processus), sa représentation numérique et des données captées sur le modèle physique et transmises à la réplique numérique capable, grâce à ses dernières, d'agir, théoriquement, en temps réel sur la réalité modélisée.

Le JN s'inscrit dans une longue histoire ponctuée de différentes étapes (voir fig. 1), de la maquette en carton jusqu'aux modèles informatiques plus sophistiqués à l'image des *Building Information Modeling* (BIM). Ces étapes intermédiaires sont parfois confondues avec le JN lui-même, ce qui complique la stabilisation de sa définition.

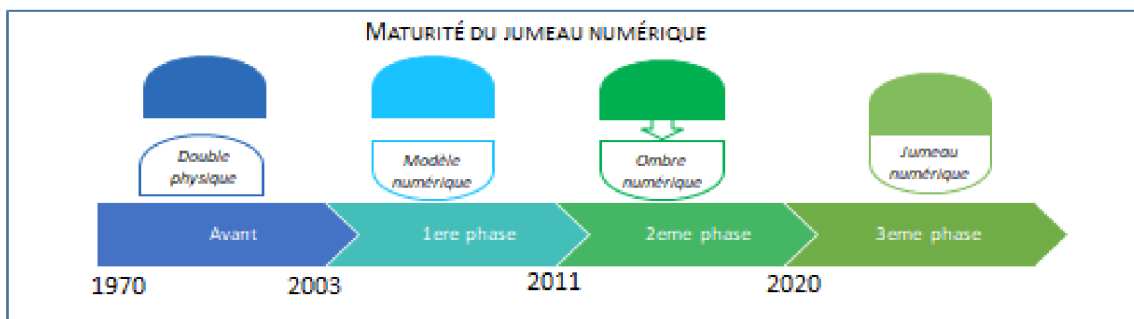


Figure 1 : Évolution de la notion de jumeau numérique dans le temps. Repris de Julien et Martin, *Le jumeau numérique, de l'intelligence artificielle à l'industrie agile*, 2020, Dunod,

De multiples variantes du JN émergent selon les domaines d'activités, les volontés et capacités des acteurs impliqués, ou encore les données disponibles. Ainsi, nous nous sommes étonnés de découvrir plus d'une cinquantaine de définitions du JN, souvent liées à des objectifs de communication portés par des acteurs industriels.

Le JN dans le contexte des transitions environnementale et sociale

« L'avenir est à l'optimisation globale de toutes les phases du cycle de vie d'un produit, la doublure numérique fait partie des éléments incontournables de l'entreprise 4.0 du futur et constitue un paramètre clef de différenciation des fabricants de matériels et/ou des opérateurs d'usines »¹ assurait-on, en 2018. Largement présent dans l'industrie, le JN tend aussi à se développer dans des domaines tels que la santé, l'urbanisme, le patrimoine. Grâce à ses performances technologiques, il est attendu de lui une aide pour maîtriser les phénomènes les plus complexes.

Nourris des multiples apports des intervenants du cycle de l'IHEST 2021-2022 sur les ressources à mobiliser pour les transitions et par nos échanges préparatoires à cette note, nous nous interrogeons sur le rôle du JN. S'il apparaît clairement que le JN est un élément de la transition numérique, serait-il

¹ livre blanc « Pour une politique industrielle du numérique » 2018, ANRT, p.26 <https://hal.inrae.fr/hal-02786563/document>

aussi la promesse d'une optimisation du monde et par là-même un outil au service des transitions environnementale et sociale ?

Pour répondre à cette question, nous reviendrons, dans un premier temps, sur la naissance du JN et dresserons un état des lieux de son développement. Puis, nous analyserons dans quelles mesures le JN pourrait servir les transitions écologique et sociale. Enfin, nous nous arrêterons sur quelques défis qui nous ont semblé prioritaires à relever afin de formuler des recommandations pour un usage «raisonné» du JN.

Partie 1- Les JN : réalité, emballage ou mirage ?

« Bienvenue dans la renaissance industrielle ! » Sébastien Massard, Dassault Systems.

1.1 Une réalité industrielle

Historiquement, **l'industrie aéronautique constitue le secteur pionnier** dans l'utilisation des JN et en fait toujours un large usage (Gregorio, 2020). En 1989, Dassault Système crée le premier JN d'un avion civil qui permet le travail conjoint, dans un monde virtuel, du bureau d'études, du donneur d'ordre et des sous-traitants. Dans la poursuite de ce travail, Boeing aboutit à la mise en service de son modèle 777 en 1995. Le déploiement des JN dans d'autres industries débute au début des années 2000, parallèlement au développement des équipements et logiciels de réalité virtuelle, du WEB 2.0, de l'internet des objets, de l'intelligence artificielle. Les JN portent alors sur une unité opérationnelle (robot, machine-outil), une ligne de production, voire un site de fabrication.

Le JN s'étend **progressivement dans tous les secteurs industriels** en réponse au besoin d'anticiper les aléas dans le cycle de vie des systèmes et processus de production (pannes, dérives process, gestion de crise, etc.) en intégrant les exigences de traçabilité, de qualité, de performance énergétique, ou pour mettre en place une maintenance prédictive. Les exemples se multiplient : Renault a recours à un JN pour optimiser le temps d'occupation des chaînes de production des moteurs ; le groupe Mars utilise un JN pour augmenter l'efficacité de ses 160 sites de production de barres chocolatées. Les JN sont mis en œuvre pour piloter des centrales thermiques, des centrales hydroélectriques, ou des parcs éoliens, pour anticiper les contraintes des infrastructures, notamment la corrosion des pylônes. Dans les secteurs du transport et de la logistique, Hardis Group a créé un JN d'entrepôt pour optimiser son process logistique, tandis que le port de Saint Nazaire a déployé le JN de l'écluse Est lors de sa rénovation en 2019 et que SNCF Réseau travaille à la création d'un JN du réseau ferré français.

1.2 A la conquête de tous les secteurs

L'engouement actuel pour les JN fait l'objet de fortes conjectures dans le monde industriel : en 2017 le cabinet Gartner identifie les JN parmi les 10 technologies les plus prometteuses et prévoit qu'en 2026 plus de la moitié des industries manufacturières s'équipent².

Aujourd'hui, **le JN sort du monde industriel** pour investir les secteurs de la santé (Balfagon, 2022; Faudot, 2022), de l'agriculture (Pylianidis et al., 2021; van der Brug, Simone et al. , 2021) de la gestion des territoires (Wildfire, 2022). Pour guider les élus locaux qui se voient proposer des JN pour une gestion optimisée de leur ville, la Banque des Territoires (2021) a publié un rapport au titre éloquent : « *Miroir, miroir... le jumeau numérique du territoire* ».

Depuis sa naissance dans les années 2000, le terme « jumeau numérique » est rapidement repris, dans la presse professionnelle et les publications scientifiques. Le JN apparaît dans les appels à projet de recherche (16 projets en cours de financement par l'ANR y font explicitement référence). Intéressées par les promesses d'innovation, **la France et l'Europe soutiennent des projets de JN** parfois de très grande échelle, comme *Destination Earth* (Viola, 2019).

Ces dernières années, les JN font aussi leur apparition dans les pages sciences ou société des médias grand public, présentés comme une promesse de révolution technologique au service d'une société ultra connectée (Coventry, 2021). Il bénéficie de l'essor des métaverses (Tisseron, 2022) avec lesquels il est parfois abusivement confondu. Contrairement à ces mondes numériques, le JN ne peut être séparé du monde réel.

² <https://www.gartner.com/newsroom/id/3812063>

Cet engouement s'illustre aussi par la mise en place de **formations et de chaires de recherche dédiées aux JN** dans des écoles d'ingénieurs et universités : CNAM, université de Bretagne Sud, INSA... De Bac +2 à Bac +5, des formations aux métiers de l'électronique, de l'informatique, de l'automatisme intègrent désormais le concept de JN.

1.3 Un engouement à nuancer

Si les JN portent la promesse de grandes mutations, la réalité s'avère en revanche plus nuancée. Malgré une promotion dynamique et une omniprésence dans les discours de l'innovation, les JN ne font l'objet que de quelque 5000 publications en 15-20 ans (Web of sciences), ce qui est relativement peu, au regard des enjeux annoncés³, d'autant que les articles se concentrent essentiellement dans les sciences de l'ingénieur et du management qui s'intéressent aux enjeux des manufactures (Jones, Snider et al 2020).

En outre, **le marché du JN reste très modeste**. Estimé à 3,1 milliards € en 2020⁴ il représenterait actuellement un millième des dépenses IT dans le monde qui s'élèvent à 3870 Mds de USD en 2020⁵. Pour comparaison, les jeux vidéo ont réalisé un chiffre d'affaires mondial en 2020 de 180 Mds USD. Poids lourds de l'informatique, spécialistes de la simulation 3D, opérateurs du cloud, spécialistes de l'IA, nombreux sont les acteurs qui proposent des solutions de JN. Face à une offre hétérogène, l'entreprise qui souhaite développer un JN doit choisir sans disposer forcément de toutes les compétences internes : programmation, gestion de données, IoT... (cf Annexe 2). La mise en place reste coûteuse : équipements, prestations de service, formation des équipes, particulièrement pour les entreprises aux structures digitales sommaires et aux dispositifs de sécurité informatique fragiles. De fait, **l'implémentation d'un JN a surtout concerné les grandes entreprises**.

Par ailleurs, au-delà d'un certain niveau d'intégration, **la modélisation des systèmes complexes reste une gageure**. Ainsi, concernant le vivant, certaines fonctions vitales peuvent être représentées par des réactions biochimiques⁶ ou des séquences métaboliques (production d'énergie, effet d'un médicament, etc.), par des représentations physiques élémentaires (circulation du sang, respiration) ou même par des modèles complexes (rythme cardiaque, influx nerveux,...). Cependant leur modélisation demeure partielle et approximative. Quand la puissance de calcul des outils informatiques le permet, les simulations ont prouvé leur utilité en pharmacologie moléculaire, pour la conception de médicaments (comme le premier médicament contre le sida), ou en biomécanique pour réaliser une prothèse « sur mesure ». En revanche, les tentatives de modélisation poussée sur des fonctions complexes se sont soldées par des échecs retentissants (projet *Human Brain* par exemple⁷) ou des désillusions (médecine prédictive par tests ADN). Pour autant, le concept de JN du vivant est encore régulièrement présenté comme le futur de la médecine humaine.

Enfin, ainsi que Jean-François Lucas, sociologue de la ville numérique, autant que la philosophe des sciences Julie Jebeille l'expliquent, l'utilisation de la terminologie « jumeau numérique » s'avère impropre et révélatrice de cette utopie selon laquelle la production de l'environnement numérique serait le reflet à l'identique de son modèle. Beaucoup de sciences de la nature (physique, chimie), de

³ Google Scholar ne recense que 19 100 références pour « Digital Twin* » toutes années confondues pour une requête dans les « articles de revue » normalisés (hors livres et documents tous formats), contre par exemple 446 000 références « articles de revue » pour un concept proche comme celui de « Building information modeling ». Une requête identique sur « Jumeau* numérique* » ne renvoie que 34 articles de revues académiques !

⁴ Rapport Markets and Markets septembre 2021 : « Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Application (predictive maintenance), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, Healthcare), and Geography - Global Forecast to 2026 »

⁵ Communiqué de presse Gartner DU 20/10/2021 : « Gartner Forecasts Worldwide IT Spending to Exceed \$4 Trillion in 2022 » :

<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-10-20-gartner-forecasts-worldwide-it-spending-to-exceed-4-trillion-in-2022>

⁶ Annexe 4 - Modèle Et Modélisation, P.24

⁷ <https://www.technologyreview.com/2021/08/25/1032133/big-science-human-brain-failure/>

la Terre et de l'Univers (astrophysique⁸, sismologie, météorologie) reposent en grande partie sur l'utilisation et/ou sur l'élaboration de modèles suivie de leur confrontation avec des observations de phénomènes. L'activité de modélisation consiste à simplifier une réalité complexe pour la décrire et pouvoir utiliser des lois mathématiques sur les éléments ainsi modélisés (cf. annexe 4). **La réplique, bien que numérique, n'est pas complète.** Elle reste nécessairement simplifiée, parce que certaines informations sont inconnues ou inutiles pour le concepteur. Elle est aussi nécessairement subjective car la neutralité technologique n'existe pas. Le JN intègre les choix du concepteur, son opinion, sa vision, sa culture (Korenhof, Blok et Kloppenburg, 2021) Antoine Courmont, sociologue du numérique, l'a formulé ainsi « Toutes les données contiennent une certaine représentation du monde social, déterminée par la volonté des acteurs d'intervenir sur celui-ci. » (Courmont, 2015). En allant plus loin, il devient facile d'imaginer que le concepteur pourrait volontairement modifier le JN pour altérer, biaiser la vision du réel en influençant le regard de l'utilisateur.

Partie 2 - Le JN : une ressource au service des transitions environnementale et sociale ?

« Le déploiement du numérique, tel qu'il se joue depuis plusieurs années, est incompatible avec le développement de la vie sur Terre ». Fabrice Flipo - La numérisation du monde, une catastrophe écologique.

2.1 Un outil de sobriété et d'optimisation industrielle ?

Facteur d'optimisation du cycle de vie d'un produit, le JN permet dans le secteur de la production industrielle ou de la construction, par exemple, d'optimiser l'utilisation des matériaux et de maximiser la performance énergétique des bâtiments. Ainsi, l'une des quêtes de la modélisation de la ville est de fusionner les processus sociaux et économiques avec l'environnement bâti et de relier les processus fonctionnels et physiques aux représentations socio-économiques. (cf Annexe 5). Il promet de modéliser les comportements de ses éléments et de ses flux afin d'établir et de calculer les scénarios d'actions ou de réactions. Les domaines d'applications attendus concernent principalement l'éclairage, les fluides et l'énergie, la pollution, le climat, la mobilité, les infrastructures, la propreté, la sécurité (Emmerich, 2020). Toutefois plus que le cadre urbain, le JN s'applique essentiellement à la gestion logistique du bâtiment (BIM).

Outil d'analyse de systèmes complexes, au service de la gestion optimisée des matières premières et d'une certaine sobriété énergétique, le JN semble donc répondre aux exigences de la transition écologique. Cependant nos investigations nous ont amenées à soulever quelques paradoxes.

2.2. Un outil dans la lutte contre le réchauffement climatique ?

Le deuxième volet du rapport du GIEC (février 2022) rappelle l'interdépendance de l'homme et de son écosystème face à l'évolution du climat. Les risques liés au réchauffement climatique deviennent de plus en plus complexes à appréhender. Les menaces climatiques nécessitent d'engager des actions anticipées et concertées.

Plusieurs projets très ambitieux de JN sont engagés pour tenter de gérer cette complexité grandissante. Le programme *Destination Earth*⁹, porté par la commission européenne, prévoit de créer plusieurs répliques numériques thématiques de très haute précision de la Terre. Prévu pour être réalisé en une décennie avec un budget de 150 millions € pour la première phase, de 800 à 900 ensuite, il vise à surveiller et simuler l'activité naturelle et humaine sur l'ensemble du globe afin de construire et tester des scénarios qui devraient favoriser un développement plus durable.

⁸ Annexe 5 - Jumeaux Numériques Urbains : Les Limites D'une Mise En Équations

⁹ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>

De leur côté, les Nations Unies, dans le cadre de la décennie des sciences océaniques¹⁰, projettent de modéliser les océans. Là encore, l'usage de JN conjuguant des masses considérables de données issues des sciences dures, sociales, économiques et juridiques, avec l'aide d'intelligence artificielle, devrait permettre de produire de nouvelles analyses accessibles aux chercheurs, aux décideurs publics et aux citoyens en étayant la capacité d'actions futures (Correia, 2022; Chapron, 2022). Toutefois, avec une consommation de 3,5% de l'énergie mondiale en 2019 d'après F.Flipo (2021), et une croissance de 6 % par an, le numérique n'est-il pas en lui-même un acteur paradoxal du réchauffement du climat qu'il entend contribuer à préserver ? De plus, la dématérialisation du numérique n'est qu'apparente car elle s'accompagne d'une augmentation des besoins matériels de stockage des données.

Selon une récente étude d'IDC, cabinet de recherche international dans le domaine des technologies, le volume de données stockées atteindra 175 Zo (zettaoctet) en 2025, soit 5,3 fois plus que ce qui était stocké en 2018 (Ferreboeuf, 2020, p. 29). Or chaque octet supplémentaire nécessite de l'énergie pour être stocké. Puisqu'il faut aujourd'hui stabiliser et réduire les émissions de CO₂, il faut parvenir à stabiliser cette courbe en dédiant nos capacités de stockage aux données les plus utiles.

Le « techno-solutionnisme » (Morozov, 2013) sous-tendu par les JN peut-il vraiment contribuer à faire face aux enjeux climatiques ? Un objectif de sobriété ne serait-il pas plus approprié ? Le JN pourra-t-il compenser l'énergie qu'il consommera par une gestion optimisée de la production et la conception de solutions adaptées à la transition écologique ? Par ailleurs, est-ce que tendre à optimiser n'est pas aussi une manière de chercher à conserver des modèles qu'on rend dans le même temps responsables des problèmes environnementaux actuels ?

2.3. Un outil compatible avec la transition sociale ?

L'optimisation de la productivité et l'automatisation de la prise de décision sont-elles les solutions dont a besoin la transition sociale ? Que produit un modèle industriel quand il est transposé dans des secteurs comme l'urbanisme ou l'agriculture ?

Par leur vocation à agréger de nombreuses données et à les traiter au travers d'un couplage de différents modèles, les JN risquent d'engendrer une certaine opacité des schémas d'analyse de l'information - qui peuvent devenir inaccessibles à celui qui s'en saisit - et des processus de collecte des données - qui peuvent se faire à l'insu de ceux qui les fournissent. Selon Voarino (2019), dans une réflexion élargie à l'intelligence artificielle, cette opacité intrinsèque est « à la source de différentes préoccupations éthiques relatives à la protection de la vie privée et de l'intimité, au consentement libre et éclairé, à la justice sociale, à la déshumanisation des soins et du patient, ou encore à la sécurité. ».

Par ailleurs, l'automatisation de tâches de plus en plus complexes peut conduire à un moindre contrôle de l'utilisateur et pourrait laisser une impression « d'objectivité absolue » trompeuse (Rouvroy et Berns, 2013). Le fonctionnement du JN cesse alors d'être transparent, et ne se situe plus « dans un mouvement continu et ininterrompu de la pensée » (Descartes, 1629). On fait alors confiance à une capacité supérieure de calcul, qui produit des solutions rapides et efficaces. Comment valoriser, dans ces conditions, le recours à l'analyse humaine ? Comment garantir que in fine, la prise de décision restera celle de l'humain ?

Le risque est aussi que la machine, se substituant à l'humain, entraîne une érosion des compétences et une perte de responsabilité systématique dans la décision politique ou scientifique.

¹⁰ <https://fr.unesco.org/underwater-heritage/UN-decade>

De ce fait, la transposition des JN à des secteurs complexes, sensibles ou soumis à des règles éthiques, doit interroger sur les conséquences en matière de compréhension et d'affaiblissement cognitif de l'utilisateur.

2.4 Continuité ou rupture ?

Bien que la capacité du JN à stocker, à agréger et à calculer soit nettement supérieure à celle d'un humain, l'information produite à partir de l'analyse des données est-elle suffisante pour résoudre des problèmes complexes ? Un JN de la Terre est-il la solution à ses maux ? Une ville peut-elle être pilotée sur la base de son JN ?

Aucune donnée n'est neutre et en conséquence, les solutions issues de leur analyse non plus. **Il est à craindre qu'en tant qu'outil de gestion, le JN peine à renouveler le fonctionnement de nos modèles de société face aux défis environnementaux et sociétaux.** Certes, il devrait permettre de faire mieux en conciliant, autant que possible, économie, société et environnement, mais **il ne conduit pas à faire différemment et ne constitue pas un outil de rupture au service des transitions.** Or, si comme l'avance le philosophe P. Charbonnier (2013), nos rapports collectifs à la nature, au matériel sont indissociables du politique, travailler à résoudre la crise environnementale actuelle ne peut se faire sans une réinvention du politique ; sachant que selon lui, « toutes les questions socio-politiques ont trait à des décisions sur la régulation économique de l'usage des ressources ». En conséquence, l'outil ne devrait pas précéder la réflexion, mais justifier un travail de fond visant à repenser l'imbrication des schémas politiques et matériels, ainsi qu'à préciser les objets à observer et à analyser.

Par ailleurs, comme l'analyse J.-F. Lucas, le JN fruit du travail d'ingénieurs, véhicule une vision extrêmement fonctionnelle de l'objet dupliqué. Suivant cette analyse, il est à craindre que le JN ne se réduise à l'image de l'objet tel qu'appréhendé par ses concepteurs et qu'il ne soit donc en rien le point de convergence de visions et d'imaginaires complémentaires, qu'il devrait être pour rendre les services qu'on attend de lui.

En résumé, le JN peut être un outil intéressant à condition qu'il ne précède pas la pensée politique et s'il prend place parmi d'autres outils : numériques (datavisualisation, cartographie, réseaux sémantiques) ou autres (concertation citoyenne, enquêtes sociologiques...).

Partie 3 - Défis et recommandations

« Le monde numérique s'est développé si vite qu'il en est encore au stade du western : les injustices foisonnent, l'État ne comprend pas assez bien pour légiférer correctement, et les citoyens sont perdus. » Serge Abitboul, INRIA¹¹

3.1 Garantir la protection et l'interopérabilité des données

La conception et l'exploitation d'un JN posent la question du partage, de la gouvernance, de l'interopérabilité et de la sécurité des données. Il n'est que de penser à l'enjeu que représente la collecte massive de données médicales ! (Savicev, 2021).

En collectant des données de terrain (eau, air, consommation, éclairage, déchets, trafic), le JN permettrait aux élus d'administrer leur ville en visant des économies, l'amélioration des services et la qualité de vie des citoyens. Pourtant, à l'ère où la data est devenue « le pétrole du XXIème siècle », **comment convaincre les détenteurs et collecteurs de données de les partager ?** Depuis la loi

¹¹ Cité par Zeitoun, 2018.

pour une République numérique de 2016, les collectivités locales de plus de 3 500 habitants sont tenues de publier, dans un format ouvert et exploitable, les données revêtant un intérêt économique, social, sanitaire ou environnemental. Toutefois, certains opérateurs privés (distributeurs d'eau, de gaz ou d'électricité, opérateurs de télécommunications) refusent encore d'ouvrir leurs données et les citoyens de les partager sans garanties, ni bénéfiques. L'abandon du projet de smart city à Toronto est, à ce titre, riche d'enseignements (Collectif, 2020).

Le projet *Self Data Territorial*, initié par la Fondation Internet Nouvelle Génération (FING, 2019), propose de replacer le citoyen au cœur du cycle de vie de la donnée urbaine en associant des collectivités et des opérateurs de l'énergie. Ce programme suggère **des modèles de gouvernance de partage des données** (cloud personnel, plateforme tiers de confiance, coopérative de données).

Par ailleurs, **l'agrégation des données au sein d'un JN exige leur interopérabilité**. Les JN doivent s'appuyer sur des données existantes hétérogènes qui n'ont souvent pas été pensées pour être rassemblées. Aujourd'hui, et indépendamment des enjeux de protection et de partage, ce n'est pas tant la complexité technologique que la normalisation des données qui constitue le défi dans beaucoup de situations (exemples : SNCF ou JN des villes).

Enfin, en tant que gestionnaire de multiples données, **le JN soulève la question de leur sécurité**. La cybersécurité, enjeu majeur des entreprises, collectivités et gouvernements, est cruciale pour le développement des JN et gage de confiance envers la gouvernance. Pourtant, en 2019, la cybersécurité ne représentait que 5% des dépenses consacrées aux technologies de l'information et de la communication (Karayan, 2021). La crise sanitaire actuelle et le contexte géopolitique extrêmement tendu augmentent les menaces de cybercriminalité. Des efforts stratégiques doivent être menés : actions de sensibilisation aux risques cyber, montée en compétences dans la maîtrise des systèmes d'information, formation en nombre d'experts en cybersécurité, augmentation des budgets investis dans la sécurité informatique.

3.2 Fixer un cadre juridique

Le JN n'est pas structuré juridiquement. Il n'existe tout simplement pas dans les textes réglementaires ou législatifs alors qu'il est générateur de risques qui doivent être encadrés.

Quelles normes s'appliquent au JN ? Peut-on appliquer des règles qui existent déjà dans certains domaines et qui s'appliquent à certains points du JN : la réglementation relative aux données, le droit de la propriété, l'assurance ?

Quelle que soit l'utilisation finale du JN, quatre acteurs interviennent : le fabricant ou concepteur, l'acquéreur, l'utilisateur et l'exploitant. Chacun de ces acteurs a des droits, des responsabilités et des devoirs dans son rapport au JN.

Si la question est plus simple concernant les JN industriels qui font partie d'une entreprise et dont l'objet réel est lui-même cadré par une réglementation claire, l'approche est plus complexe lorsque ces acteurs sont différents, comme dans un bâtiment d'habitation connecté, à l'échelle d'une ville ou encore dans le secteur de la santé.

Le domaine juridique le plus évident et le plus cadré, au moins en France et en Europe, **est celui de la donnée**. En Europe, le règlement général sur la protection des données (RGPD applicable depuis 2018) encadre l'utilisation des données personnelles et responsabilise les acteurs qui les récoltent et les exploitent, en définissant des autorités de contrôle et de régulation. De plus, l'hébergement des données de santé à caractère personnel est encadré par la loi afin de protéger les droits des personnes. La certification HDS (hébergeurs de données de santé) permet de s'assurer qu'un hébergeur respecte à la fois la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité des données (Julien et Martin, 2020).

Le devoir d'information des usagers, la commercialisation des données et leur anonymisation ne constituent pas une problématique nouvelle. Néanmoins, le cadrage n'est pas universel et s'il s'arrête aux frontières, ce n'est pas le cas de la donnée.

Par ailleurs, plusieurs questions restent en suspens, même en France : **Qu'en est-il de la propriété intellectuelle du JN, peut-on breveter un JN ?** Une des difficultés réside notamment dans le fait qu'un algorithme ne peut être breveté individuellement. Quid de l'assurance du JN et par conséquent de la responsabilité des parties dans son utilisation ?

S. Vial disait dans *L'être et l'écran* « La qualité de notre expérience d'existence dépend des appareils qui nous entourent et de la manière dont, en tant qu'instruments « *phénoménotecniques* », ils font le monde et nous le donnent. Dans ces conditions, celles et ceux qui ont la charge de concevoir ces appareils doivent être considérés comme philosophiquement responsables de l'expérience, c'est-à-dire de tout ce qui s'offre à être perçu, vécu, éprouvé » (Vial, 2013). A ce titre, **la responsabilité du concepteur va au-delà de la question juridique...**

3.3 Le rôle irremplaçable de l'humain dans la transition numérique

Plateforme collaborative, le JN doit permettre de rompre les silos entre les métiers et les organisations, tout en reposant sur la confiance mutuelle des parties prenantes (Fig. 2). Cela peut impliquer **une réorganisation profonde des méthodes de travail** et bouleverser les habitudes. Dans certains secteurs (notamment la construction, la santé), les métiers devront profondément évoluer. Indispensables à l'ensemble des citoyens, la formation et l'acculturation doivent être encouragées.

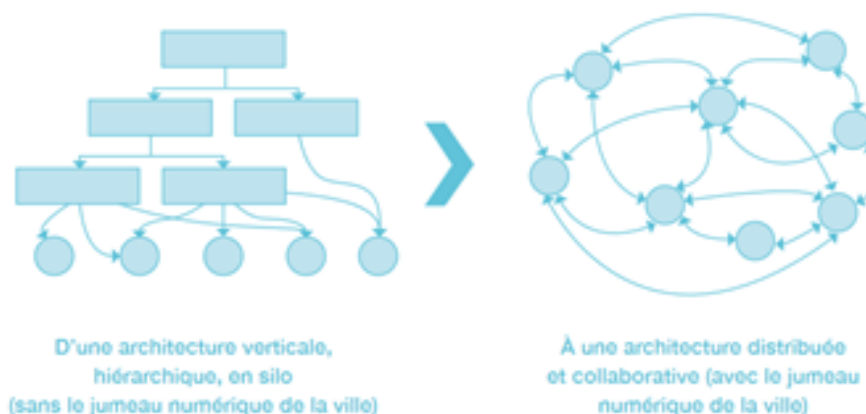


Figure 2 : « L'économie collaborative : une approche de la smart City par le service au-delà de la donnée » par Bernard Matyjasik, repris de l'étude Banque des territoires « *Miroir, miroir... le jumeau numérique du territoire* » (2021)

Les inégalités entre ceux qui maîtrisent les JN et les autres se rapprochent de la définition donnée de la fracture numérique qui identifie deux types d'inégalités : l'accès et l'usage. Mais ces deux ruptures renvoient à un paradigme plus global : en quoi un JN répond-il à un besoin ; les réponses attendues sont-elles cohérentes ?

A cet égard, les inégalités face aux JN peuvent se représenter comme l'aboutissement d'une somme d'exclusions successives limitant le nombre d'acteurs capables de maîtriser le concept. L'ambition prométhéenne du JN couplée à la numérisation croissante de la société renvoie autant de signaux d'espoir de maîtriser de plus en plus de données et informations divergentes.

Face à ces enjeux, il apparaît essentiel de développer de nouvelles compétences favorisant une collaboration directe et une vraie interaction avec un système dynamique. La montée en compétences des utilisateurs, couplée avec des systèmes de collaboration adaptés **devra intégrer un facteur humain essentiel au succès** des ambitions projetées au risque d'aboutir à des ruptures durables.

3.4. Subordonner les moyens à des objectifs raisonnables

Tout voir, tout savoir, pour tout pouvoir ! Mais dans quel but ?

L'une des recommandations conclusives du rapport de la banque des territoires (2021) insiste sur la nécessaire définition préalable des besoins non couverts par les technologies déjà disponibles, auxquels devra répondre le JN. Si son efficacité en termes d'optimisation dans le domaine industriel semble démontrée, la création d'un JN appliquée à l'ensemble des secteurs n'est pas une fin en soi. Sa finalité et sa valeur ajoutée au regard de son coût financier, humain et écologique doivent faire partie intégrante de l'étude d'opportunité préalable à sa conception.

Le JN est souvent présenté comme un outil technologique capable de répondre aux besoins et aux usages des citoyens. Pour autant, le coût financier et les coûts de sa mise en œuvre imposent de mobiliser des acteurs socio-économiques qui ont pour objectif de garantir un retour sur investissement. Assurer le bon équilibre entre intérêt privé et intérêt public, conserver la maîtrise de la finalité du JN sont autant d'éléments qui doivent être appréhendés dans la réflexion préalable à la construction d'un JN.

Aussi n'est-il sans doute pas inutile de s'interroger sur le bien-fondé de son utilisation lorsqu'on envisage d'en faire un outil au service des transitions écologique et sociale. Plutôt que de « plonger la tête la première sans trop réfléchir » comme le préconise l'entreprise Forcam¹², vous trouverez ci-dessous, en guise de conclusion, quelques éléments à avoir en tête et quelques questions à se poser avant d'envisager la création d'un JN. Mal utilisé un marteau peut servir à assommer quelqu'un, de la même façon, employé sans discernement, un JN peut, au mieux être inutile, au pire, nous faire passer à côté de l'essentiel. Et nul n'est besoin de comprendre l'informatique prédictive et les rouages de la machine pour saisir les bénéfices et les limites de l'outil.

Vade-mecum à l'intention de ceux qui envisagent de créer un JN pour répondre aux besoins de la transition écologique et sociale

A quoi peut servir un JN ?

- A agréger des données et à produire de l'analyse
- A optimiser une chaîne de production
- A faire de la maintenance prédictive
- A mieux prendre en compte la complexité de certains systèmes
- A faire travailler ensemble des services ou organismes que les organisations actuelles cloisonnent
- A repenser la gouvernance

Quelles sont ses limites ?

- Il est une réplique simplifiée et orientée du réel
- Il est un outil sophistiqué dont la mise en équations nécessite de multiples compétences
- Il a une empreinte environnementale élevée
- Il représente un fort investissement en développement et en maintenance

¹² <https://forcam.com/fr/jumeau-numerique-en-production/>

Les questions à se poser avant d'envisager le développement d'un JN

Quelles parties du système, du processus ou de l'objet je choisis de regarder au travers du JN ?

- Quels éléments sont laissés de côté ?
- Pourquoi ces choix ?
- Des technologies répondant à mes besoins sont-elles déjà disponibles ?

Quel est son coût environnemental ?

- Quels gains attendus, pour quels coûts ?
- N'existe-t-il pas un autre outil plus sobre qui répondrait à mes besoins ?
- Est-ce compatible avec les objectifs de lutte contre le réchauffement climatique ?

Quel est son impact sociétal ?

- Les professionnels et citoyens sont-ils prêts humainement ?
- Quelles incidences sur le lien social, quel coût sur la santé physique et mentale ?
- Quelles conséquences sur l'organisation du travail ?
- Quel est l'effet sur le système, le processus ou l'objet dupliqué ?
- Quels moyens mettre en œuvre pour conférer aux citoyens / employés / partie prenante un rôle d'acteur (justice sociale, transparence, formation) ?

Quel modèle de gouvernance ?

- Comment garantir une utilisation des données personnelles au service du collectif ?
- Comment seront collectées les données, où seront-elles stockées, à qui seront-elles accessibles ? Quel système de sauvegarde sera utilisé ?
- Comment pourrai-je garantir la sécurité des données ?
- Comment assurer le bon équilibre entre intérêts privés et publics
- Comment mobiliser tous les acteurs socio-économiques ?
- **Comment garantir qu'il ne se substitue pas à la décision politique ?**

RÉFÉRENCES

Ailliot, Pierre, Anne Cuzol, Gilles Durrieu, et al. « Synthèse des questions mathématiques soulevées par la mise en oeuvre de jumeaux numériques pour le suivi et le pilotage de systèmes dynamiques en entreprises. » *HAL - Archives ouvertes*. 2021. En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03167416>

Alizon, Samuel. « « Avec le Covid-19, la modélisation des épidémies s'ouvre aux données massives » », *Pour la science*. novembre 2021 n° 529. novembre 2021. En ligne : <https://www.pourlascience.fr/sd/epidemiologie/https://www.pourlascience.fr/sd/epidemiologie/avec-le-covid-19-la-modelisation-des-epidemies-s-ouvre-aux-donnees-massives-22563.php> [consulté le 1 avril 2022].

Balfagon, Sarah. *Mon médecin, mon jumeau numérique et moi*. 2018. En ligne : <https://www.whatsupdoc-lemag.fr/article/mon-medecin-mon-jumeau-numerique-et-moi> [consulté le 1 avril 2022].

Banque des Territoires. *Miroir, miroir... : le jumeau numérique du territoire*. Caisse des dépôts et consignations. 2021. En ligne : <https://www.banquedesterritoires.fr/miroir-miroir-le-jumeau-numerique-du-territoire-0> [consulté le 14 avril 2022].

Bourgain, Catherine et Iris Deroeux. « *Les mots de la science* » : *M comme modélisation*. En ligne : <http://theconversation.com/les-mots-de-la-science-m-comme-modelisation-160715> [consulté le 1 avril 2022].

van der Burg, Simone, Sanneke Kloppenburg, Esther J. Kok, et al. « Digital twins in agri-food : Societal and ethical themes and questions for further research », *NJAS: Impact in Agricultural and Life Sciences*. 1 janvier 2021, vol.93 n° 1. p. 98-125.

Chapron, Bertrand. *Les océans bientôt dotés de jumeaux virtuels, pour quoi faire ?* En ligne : <http://theconversation.com/les-océans-bientôt-dotes-de-jumeaux-virtuels-pour-quoi-faire-160425> [consulté le 17 mars 2022].

Charbonnier, Pierre. « Le rendement et le butin. Regard écologique sur l'histoire du capitalisme », *Actuel Marx*. 1 janvier 2013, n° 53. p. 92-105.

Collectif. « « Google City » de Toronto : les raisons d'un échec », *Les Echos*. 18 mai 2020. En ligne : <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/opinion-google-city-de-toronto-les-raisons-dun-echec-1203831> [consulté le 14 avril 2022].

Correia, Mickaël. *One Ocean Summit : face à l'urgence climatique, « un imaginaire tec...* En ligne : <https://www.mediapart.fr/journal/international/110222/one-ocean-summit-face-l-urgence-climatique-un-imaginaire-technocentre> [consulté le 1 avril 2022].

Courmont, Antoine. « Open data et recomposition du gouvernement urbain: de la donnée comme instrument à la donnée comme enjeu politique », *Informations sociales*. 2015 n° 5. p. 40-50.

Coventry, Paul. « Are we living in a simulation? Find out here », Blog *Ericsson Blog*. 2021. En ligne : <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/6/are-we-living-in-a-simulation> [consulté le 16 mars 2022].

Descartes, René. *Règles pour la direction de l'esprit*. 1629. Paris, Librairie générale française, 2002.

Dedryver, Liliane. *Maîtriser la consommation énergétique du numérique : le progrès technologique n'y suffira pas*. Rapport 2020-15. France Stratégie. 2020. En ligne : <https://www.strategie.gouv.fr/publications/maitriser-consommation-energetique-numerique-progres-technologique-ny-suffira> [consulté le 1 avril 2022].

Emmerich, Sarah. *La smart city en 10 questions. Comprendre les nouveaux enjeux numériques urbains*. [s.l.] : Territorial Editions. 2020. (Les Essentiels). En ligne : <https://www.decitre.fr/livres/la-smart-city-en-10-questions-9782818616390.html> [consulté le 14 avril 2022].

Faudot, Barthélémy. *Développement d'un jumeau numérique de la main pour l'analyse biomécanique de l'arthrose et de ses traitements chirurgicaux*, Thèse de doctorat : Aix-Marseille Université. 2021. En ligne : <https://www.theses.fr/2021AIXM0195> [consulté le 1 avril 2022].

Ferreboeuf, Hugues. *Déployer la sobriété numérique*. The Shift Project. 2020.

FING. *Kit Self Data Territorial*. Fondation internet nouvelle génération. 2019. En ligne : <https://fing.org/publications/kit-self-data-territorial.html> [consulté le 14 avril 2022].

Flipo, Fabrice. *La numérisation du monde: Un désastre écologique*. Paris : L'Echappée. 2021. 173 p.

Flipo, Fabrice. *L'impératif de la sobriété numérique*. [s.l.] : Éditions Matériologiques. 2020. En ligne : <https://www.cairn.info/l-imperatif-de-la-sobriete-numerique--9782373612585.htm> [consulté le 1 avril 2022].

Gregorio, Jean-Loup. *Contribution à la définition d'un jumeau numérique pour la maîtrise de la qualité géométrique des structures aéronautiques lors de leurs processus d'assemblage*. Thèse de doctorat : Université Paris-Saclay. 2020. En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02616138> [consulté le 1 avril 2022].

Grieves, Michael. *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*. LLC. Florida Institute of Technology. 2014.

Jones, David, Chris Snider, Aydin Nassehi, et al. « Characterising the Digital Twin: A systematic literature review », *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 1 mai 2020, vol.29. p. 36-52.

Julien, Nathalie et Eric Martin. *Le jumeau numérique. De l'intelligence artificielle à l'industrie agile*. Dunod : 2020. En ligne : https://www.decitre.fr/ebooks/le-jumeau-numerique-de-l-intelligence-artificielle-a-l-industrie-agile-9782100814039_9782100814039_9.html [consulté le 14 avril 2022].

Karayan, Raphaëlle. « Cybersécurité : les RSSI face à un déficit de budget... et d'influence », *L'usine digitale*. 5 novembre 2021. En ligne :

<https://www.usine-digitale.fr/article/etude-cybersecurite-les-rssi-face-a-un-deficit-de-budget-et-d-influence.N1157652> [consulté le 14 avril 2022].

Korenhof, Paulan, Vincent Blok, et Sanneke Kloppenburg. « Steering Representations—Towards a Critical Understanding of Digital Twins », *Philosophy & Technology*. 1 décembre 2021, vol.34 n° 4. p. 1751-1773.

Ladj, Asma, Zhiqiang Wang, Oussama Meski, et al. « A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective », *Journal of Manufacturing Systems*. 1 janvier 2021, vol.58. p. 168-179. (Digital Twin towards Smart Manufacturing and Industry 4.0).

Morozov, Evgeny. *To Save Everything, Click Here: The Folly of Technological Solutionism*. PublicAffairs. 2013.

Olhen, Peter. « L'avenir du jumeau numérique : une révolution pour les réseaux mobiles ? », Blog *Ericsson Blog*. 2021. En ligne

:<https://www.ericsson.com/fr/blog/2021/7/lavenir-du-jumeau-numerique--une-revolution-pour-les-reseaux-mobiles-> [consulté le 16 mars 2022].

Philo, La Pause. « Pourquoi on est quand même un peu dans la Matrice », Blog *La Pause Philo*. 2015. En ligne :

<http://lapausephilo.fr/2015/12/04/pourquoi-on-est-quand-meme-un-peu-dans-la-matrice/> [consulté le 1 avril 2022].

Pylaniadis, Christos, Sjoukje Osinga, et Ioannis N. Athanasiadis. « Introducing digital twins to agriculture », *Computers and Electronics in Agriculture*. 1 mai 2021, vol.184. p. 105942.

Richard, David. « Le jumeau numérique : un cerveau pluriel pour l'immeuble en quête de repères juridiques », *Signatures internationales*. juillet 2021.

Roucairol, Gérard et Pierre Bitard. *Pour une politique industrielle du numérique*. ANRT. 2018. (Les cahiers Futuris).

Rouvroy, Antoinette et Thomas Berns. « Gouvernementalité algorithmique et perspectives d'émancipation », *Réseaux*. 1 janvier 2013, vol.177. p. 163.

Savicev, Ivan. *Mon jumeau numérique est-il malade ? | EPFL | Les dossiers de l'actu*. 2021. En ligne : <https://longread.epfl.ch/dossier/mon-jumeau-numerique-est-il-malade/> [consulté le 16 mars 2022].

Science-et-vie.com. *Villes connectées : voici les premiers jumeaux numériques ! - Science & Vie*. 2021. En ligne :

<https://www.science-et-vie.com/technos-et-futur/villes-connectees-voici-les-premiers-jumeaux-numeriques-61584> [consulté le 1 avril 2022].

Tisseron, Serge. « Métavers, le nouveau Far-Ouest ? », Blog *Serge Tisseron*. 2022. En ligne : <https://sergetisseron.com/blog/metavers-le-nouveau-far-ouest/> [consulté le 1 avril 2022].

Vial, Stéphane. *L'être et l'écran : comment le numérique change la perception*. [s.l.] : Presses Universitaires de France. 2013. (hors collection). En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01164617> [consulté le 14 avril 2022].

Viola, Roberto. « Destination Earth (DestinE) contribuera au Green Deal et à la stratégie numérique », Blog *Journal Général de l'Europe*. 2020. En ligne : <https://www.journalgeneraldeurope.org/2020/09/24/destination-earth/> [consulté le 1 avril 2022].

Voarino, Nathalie. *Systèmes d'intelligence artificielle et santé : les enjeux d'une innovation responsable*. [s.l.] : Université de Montréal. 2019. En ligne : <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/23526> [consulté le 14 avril 2022].

Wildfire, Clare. *How can we spearhead city-scale digital twins?* En ligne : <http://www.infrastructure-intelligence.com/article/may-2018/how-can-we-spearhead-city-scale-digital-twins> [consulté le 14 avril 2022].

Zeitoun, Charline. « Peut-on faire confiance à l'intelligence artificielle ? », *CNRS Le journal*. janvier 2018. En ligne : <https://lejournel.cnrs.fr/articles/peut-faire-confiance-a-lintelligence-artificielle> [consulté le 14 avril 2022].

ANNEXES

ANNEXE 1 - NOTE DE CADRAGE DE L'ATELIER

Grâce aux progrès de l'informatique tirant profit de puissants ordinateurs et des réseaux, il semble que le régime de la seule représentation – figurative, cartographique - soit prochainement surpassé par celui de la simulation réaliste et fidèle. Cette dernière permet déjà de restituer plus ou moins fidèlement des phénomènes complexes, à très large échelle comme le climat ou la météo, ou plus localement, avec l'industrie ou l'architecture.

La perspective d'une modélisation plus générale, concernant l'usine ou le port du futur, voire la ville dite « intelligente », s'impose de plus en plus comme une évidence, un nécessaire destin commun nous aidant à mieux nous développer. Ainsi, une série d'annonces laissent à penser que nous pourrions prochainement bénéficier de répliques numériques s'interfaçant les unes aux autres, pour former un calque de notre monde ordinaire, un « Omniverse », comme l'a nommé récemment le fabricant de cartes graphiques Nvidia. Ce projet de duplication de notre réalité se conjugue à la promesse de mise en chantier d'autres métaverses – des méta-univers, comme Horizon, porté par Facebook, qui eux reconduisent la course aux univers persistants, mais sous un jour plus sérieux que celui des jeux vidéo et autres Second Life fantaisistes, puisque ce seront nos identités réelles qui s'y engagent.

Alors que ces actualités évoquent des projets anciens, comme le bien français et pionnier Deuxième monde, qui offrait dès 1997 de s'immerger entre avatars dans un Paris partiellement reconstitué en 3D, que penser de ces chantiers pharaoniques lancés à grand renfort d'embauches et d'investissements ? Est-ce qu'ils auront l'allure de mirages, de type Earth 2.0 (Terre 2.0) ou de véritables « mondes miroirs » ? S'agira-t-il d'une possibilité vouée à s'imposer, aussi inéluctable que l'entreprise de cartographie mondiale qui a finalement bel et bien abouti, satellites aidant ? Cette virtualisation nous fournirait-elle de nouveaux leviers pour mieux gérer notre environnement ?

Parallèlement, émerge depuis une bonne dizaine d'années la notion de « jumeau numérique » (digital twin), qui correspond au duplicata fonctionnel d'un objet technologique relativement complexe : appareils, véhicules, bâtiment. En grande partie, avec le format pivot BIM (Building Information Modeling), ces jumeaux résultent de la virtualisation des processus et chaînes de conception, qui donne des doubles exacts, valant référence des produits qu'ils engendrent. Ces nouveaux moyens de création, de suivi et d'accompagnement sont même capables de se mettre à jour en fonction des évolutions captées. En cela, ils sont mis en avant comme technologies clefs par le rapport 2020 du ministère de l'Économie, avec maints domaines d'application, y compris en santé, avec un jumeau médical de soi.

Dans ce contexte, cet atelier sera l'occasion d'interroger les relations naissantes entre les simulations réalistes et nos sociétés en quête d'innovations, de renouveau et de relais de croissance. Les prévisions de généralisation de ces modèles corrélés et référés au réel sont-elles crédibles ? En quoi les décideurs, investisseurs ou politiques sont-ils concernés par la fusion du virtuel et du réel ouvrant à des logiques « phygiales » ? Fuite en avant technologique ou meilleur ancrage par le numérique ? Promesses exagérées ou véritables programmes d'une nouvelle industrialisation ? La forte médiatisation actuelle est-elle justifiée ? Et finalement, comment se positionner face aux jumeaux numériques et aux modélisations qui se profilent comme matrices de notre futur monde commun ?

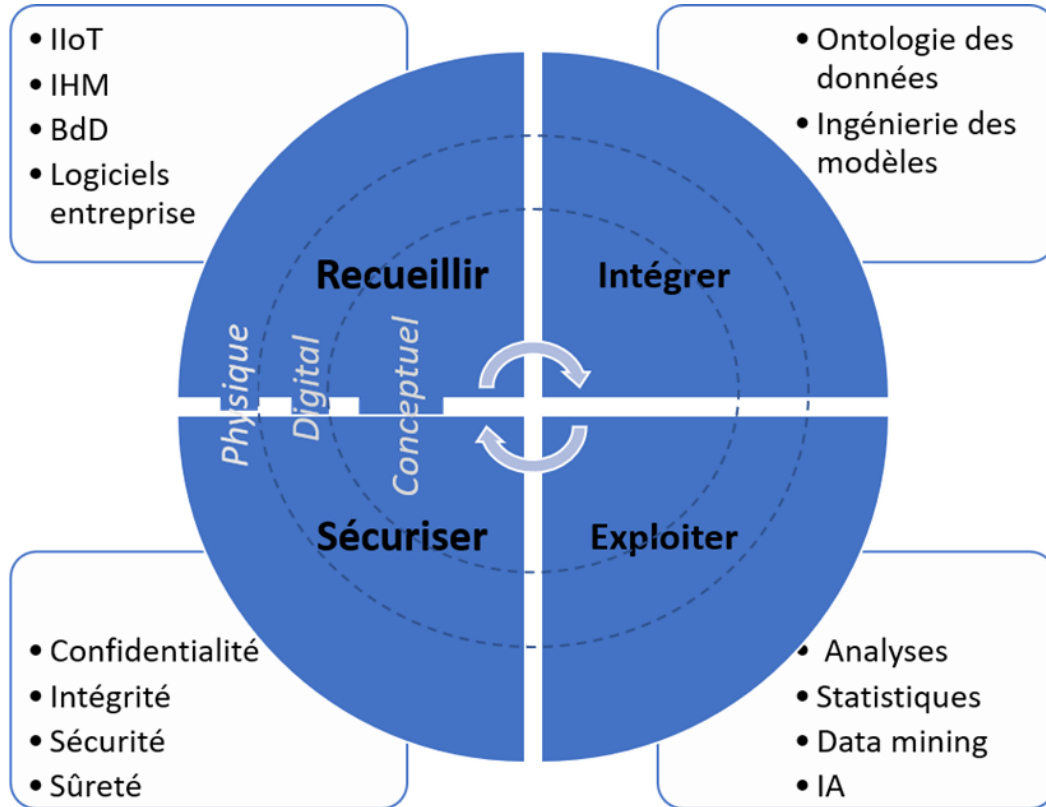
Une thématique d'atelier d'investigation proposée par Etienne Armand AMATO pour le cycle national de l'IHEST 2021-2022

ANNEXE 2- ARCHITECTURE DIGITALE D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE

Le jumeau numérique intègre différentes technologies et nécessite de multiples compétences techniques.

Réalité virtuelle, Réalité augmentée, IoT

Big data, cloud computing



Cybersécurité

Intelligence artificielle

d'après Nathalie Julien, professeur au Lab-STICC, CNRS, Université Bretagne Sud, Ensibs.

ANNEXE 3 – GLOSSAIRE

BdD base de données distribuées : base de données dont certaines portions sont stockées à plusieurs endroits physiques. Le traitement est réparti ou répliqué entre différents points d'un réseau.

BIM : *Building Information Modeling* ou modélisation des informations de la construction : méthode de gestion collaborative des projets de construction, basée sur une maquette numérique 3D contenant des données fiables et structurées.

Cloud computing : ensemble de logiciels ou de données hébergés ou lancés sur des serveurs distants, accessibles depuis n'importe où sur internet.

Data mining : ensemble des technologies capables d'analyser des données et de les transformer en informations utiles, en établissant des relations entre les données ou en repérant des modèles.

IA Intelligence artificielle : ensemble de techniques visant à permettre aux machines d'imiter une forme d'intelligence réelle.

IT : *Internet Telecommunication*

IHM interface homme-machine : désigne l'ensemble de moyens et outils informatiques mis en place pour favoriser la communication entre un humain et une machine. Elle facilite l'interaction.

IoT *Internet of Things* ou internet des objets : caractérise des objets physiques connectés ayant leur propre identité numérique et capables de communiquer les uns avec les autres.

IloT *Industrial Internet of Things* ou internet industriel des objets : utilisation d'appareils intelligents connectés dans des applications industrielles visant à l'optimisation des process de production (automatisation, surveillance à distance, maintenance prédictive).

Metaverse : réseau persistant, évolutif, de mondes virtuels interconnectés, axé sur l'interaction en temps réel, où les personnes peuvent travailler, interagir socialement, effectuer des transactions, jouer et créer.

Réalité augmentée : technique qui superpose à la réalité sa représentation numérique actualisée en temps réel.

Réalité virtuelle : désigne les dispositifs permettant de simuler numériquement un environnement par la machine. Elle permet de vivre une expérience d'immersion et de mener une activité senso-motrice dans un monde artificiel.

ANNEXE 4 - MODÈLE ET MODÉLISATION

Beaucoup de sciences de la nature (physique, chimie), de la Terre et de l'Univers (astrophysique, sismologie, météorologie) reposent en grande partie sur l'utilisation et/ou sur l'élaboration de modèles suivie de leur confrontation avec des observations de phénomènes. L'activité de modélisation consiste à simplifier une réalité complexe pour la décrire et pouvoir utiliser des lois mathématiques sur les éléments ainsi modélisés. Par exemple, la chute d'une pomme peut être décrite en modélisant la pomme par un point matériel. Il s'agit d'une importante simplification qui élimine le fait que la pomme a une forme, une couleur, une composition chimique, un goût plus ou moins sucré, etc., autant d'informations qui ne peuvent être intégrées dans les lois de Newton. En sciences de la Terre, la modélisation physique peut consister à utiliser un autre phénomène physique que celui observé, mais qui lui correspondrait suffisamment pour que l'application des lois sur le phénomène modèle décrive avec pertinence le phénomène étudié. Par exemple, la chute d'une météorite sur une planète peut être modélisée par la chute d'une bille de verre sur une surface de sable. Le modèle n'est pas seulement ce qu'utilise le scientifique, c'est aussi ce que produit le scientifique. Les modèles ne sont pas dans la nature, ils ont été construits. Ils sont une transition entre l'observation et l'élaboration de la théorie. Le modèle est donc un objet dépouillé de tout ce qui ne concerne pas les propriétés étudiées. Toute la difficulté est justement de sélectionner les éléments importants, tous et rien qu'eux. L'abstraction est la base de la conception d'un modèle : un objet réel, un phénomène, est analysé afin de n'en garder que les caractéristiques essentielles, celles qui ont une influence sur ce que l'on veut étudier. La modélisation utilise les mathématiques pour la dérivation de lois de comportements physiques sous-jacentes de n'importe quel phénomène, système ou machine comme langage universel depuis la formulation des hypothèses initiales et la résolution des équations d'évolution dans l'espace et dans le temps.

ANNEXE 5 - JUMEAUX NUMÉRIQUES URBAINS : LES LIMITES D'UNE MISE EN ÉQUATIONS

L'idée du jumeau numérique dans le contexte urbain a émergé de la représentation de la ville en termes de ses actifs physiques. Les systèmes d'information géographique, leur mise à l'échelle des bâtiments et leur extension à l'exploitation des bâtiments en termes d'énergie, d'utilisation de matériaux et de leur entretien à l'aide de logiciels de modèles d'information sur les bâtiments, fournissent le contexte de représentations numériques étendues. Il est clair que ces systèmes sont des modèles qui représentent la ville sous forme numérique pouvant être très proches des équivalents physiques de base qui composent la ville. Mais ils n'incluent jamais les processus qui déterminent le fonctionnement de la ville en termes de fonctions sociales et économiques. La raison est simple et se trouve dans la difficulté à mettre en équations les processus sociaux et économiques, en particulier avec une contrainte de temps réel. Les modèles virtuels 3D, même s'ils intègrent des processus en temps réel, tels que le trafic routier, ne sont pas des modèles virtuels mais seulement des représentations qui fonctionnent sur de courtes périodes de temps et ne sont souvent que des représentations de la ville à un instant donné.

En ce sens, un jumeau numérique ressemble beaucoup plus à un modèle informatique (une simulation numérique) conventionnel, dans la mesure où il n'abstrait qu'une partie de la ville en ne considérant qu'un ensemble limité de variables et de processus. Wildfire (2018) fait une distinction très utile entre les modèles (ou jumeaux numériques) qui se rapportent à ce que nous pourrions appeler la ville à haute fréquence, par opposition à la ville à basse fréquence. Les villes à haute fréquence fonctionnent en temps réel, à l'échelle de notre temps personnel, seconde par seconde, minute par minute, jusqu'à des cycles de plusieurs jours et de mois, tandis que les villes à basse fréquence fonctionnent sur des années, des décennies, des siècles. C'est en quelque sorte la même différence qu'entre modélisation météorologique et modélisation du changement climatique. Dans ce sens, on construit des modèles pour explorer des horizons temporels très courts - ce que Wildfire (2018) appelle des modèles "réactifs" dans lesquels les retours d'information et les visualisations améliorent les interventions en temps réel ou en quasi temps réel et améliorent le bon fonctionnement de la ville au jour le jour " dans une approche d'ingénieur et des modèles " prédictifs " où "des données d'entrée sont utilisées pour améliorer le fonctionnement à plus long terme afin d'orienter les décisions d'investissement appropriées (et espérons équitables)" avec des jumeaux numériques déconnectés du temps réel dans une approche de simulations numériques dans une démarche scientifique. En fait, le terme de modèle est privilégié plutôt que celui de jumeau numérique car, dans les deux contextes, le modèle est un outil de gestion de l'information numérique. En bref, nous devons faire fonctionner le jumeau numérique hors ligne d'une manière ou d'une autre afin de pouvoir l'utiliser pour la conception du fonctionnement futur du système réel.

L'idée de rapprocher de plus en plus un modèle numérique de la réalité est en fait la raison d'être de la construction de modèles informatiques pour des simulations numériques les plus réalistes possible. Bien sûr, il existe de nombreux modèles qui sont des simplifications extrêmes de la réalité et dont la simplicité se reflète dans la raison principale pour laquelle le modèle est construit en premier lieu. Mais l'une des quêtes de la modélisation de la ville est de fusionner les processus sociaux et économiques avec l'environnement bâti et de relier les processus fonctionnels et physiques aux représentations socio-économiques. Une tentative de faire cela est contenue dans le modèle en cours de construction pour le Queen Elizabeth Park dans l'est de Londres, où un modèle 3D "Virtual London" (ViLo) est relié à des données en temps réel, ces données alimentant le modèle en temps réel (Dawkins et al., 2018). Il s'agit de commencer à relier la ville à haute fréquence avec la basse fréquence, et c'est une aventure qui ne fait que commencer utilise l'internet des objets (IoT) et le déploiement de la détection à grande échelle dans la ville exploitant les technologies de nos smartphones, ainsi que la détection physique des flux d'énergie, de trafic, etc...

Une ville à très haute performance énergétique doit fortement s'appuyer sur les échelles intermédiaires de l'îlot urbain, quartier et jusqu'au bâtiment. Un nombre significatif de travaux de modélisation de l'énergétique ont été menés considérant la globalité du système en incluant les équipements et les réseaux pour tous les vecteurs énergétiques, la morphologie du quartier et du

bâtiment, les enveloppes des bâtiments ainsi que leurs usages. Des logiciels permettant de réaliser des simulations dynamiques des systèmes énergétiques à l'échelle îlot et à l'échelle quartier ont été proposés et certains sont aujourd'hui opérationnels, aussi bien pour la conception de nouveaux systèmes énergétiques que pour l'évaluation ex-post. En particulier, leur couplage avec des maquettes numériques 3D à l'échelle quartier (réalisation de « jumeaux numériques ») devrait permettre une prise en compte plus fine des caractéristiques des ensembles bâtis et de leurs interactions. A terme, l'objectif de cette démarche de logistique des flux d'énergie est de permettre aux opérateurs d'énergie de proposer aux gestionnaires des « contrats de performance énergétique » permettant de fiabiliser les décisions et d'assurer la rationalité à moyen long terme des investissements, notamment à l'échelle du quartier au regard des objectifs de la transition énergétique et environnementale. Notons que cet aspect de maîtrise des flux dans une approche logicienne des jumeaux numériques est complètement dans la lignée de leur utilisation dans l'industrie pour optimiser des flux et réduire les coûts.

Outre la faisabilité et l'évaluation de la généralisation des différents leviers de transition bas carbone à l'ensemble d'un territoire urbain ou d'une ville (passage à l'échelle), il est nécessaire d'analyser et de mesurer les impacts de cette généralisation dans différentes directions, en particulier :

- les filières énergétiques, technologiques et économiques
- les ressources nécessaires à la mise en œuvre de ces actions (finances,...)
- les nouvelles compétences (formations)
- les réglementations, les nouvelles normes,...

En conclusion, l'évaluation de la durabilité des villes est un champ de recherche essentiel, mais qui recouvre une diversité de dimensions (économiques, sanitaires, environnementales, sociales...), d'échelles et de temporalités (a priori, a posteriori, au fil de l'eau), et qui porte par ailleurs sur une diversité d'objets (le bâtiment, les systèmes énergétiques, de transport...). Si de nombreux travaux existent, les approches sont le plus souvent partielles, et n'abordent qu'une dimension, qu'une échelle ou que des objets particuliers. De nombreux travaux se penchent sur la durabilité d'éléments du système urbain, bâtiment, quartier, système de transport, système énergétique... L'impact de chacun des éléments du système urbain pris indépendamment des autres sur la durabilité à l'échelle globale n'est aujourd'hui pas systématiquement explicité ou démontré. De nombreux travaux plaident pour une approche systémique des villes et des bâtiments, pour laquelle un important travail reste à faire. Il s'agit de contribuer à une méthode de prévision « globale » des villes qui articule les différentes dimensions et les différentes échelles et temporalités. Sa mise en œuvre nécessite l'élaboration d'une représentation commune des liens de diverses natures entre les éléments qui composent les systèmes urbains – de divers types – et les espaces qu'elles desservent/traversent. Cette formalisation – la formalisation de modèles compris de tous – se fera à travers la contribution des diverses spécialités concernées. Ce sera l'enjeu d'une modélisation partagée et globale que d'explicitier chacun de ces éléments, les intrants matériels nécessaires, les extrants, les flux... afin de représenter l'ensemble de ces éléments à l'échelle urbaine. Il s'agit également de pouvoir vérifier l'influence des actions publiques envisagées, notamment ex post. Il s'agit également de se doter d'une représentation des modalités d'apparition et des déterminants de cette performance avec comme objectif le développement d'une méthode d'évaluation globale permettant d'évaluer la capacité d'un système urbain donné à répondre aux enjeux de la mise en œuvre de villes durables et de bâtiments innovants. L'évaluation globale peut s'entendre comme l'évaluation de la capacité à donner des moyens aux collectivités territoriales d'atteindre les valeurs clés des politiques publiques nationales pour la ville durable de demain, qui sont la sobriété, la résilience, l'inclusivité et la productivité. Des propositions de méthodologies et d'outils d'autoévaluation pour les acteurs (collectivités, entreprises, citoyens...) pourront également être développées et contribuer à la gouvernance des villes durables et bâtiments innovants.

Pour en savoir plus
www.ihest.fr

Institut des hautes études pour la science et la technologie
Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
1 rue Descartes, 75231 Paris cedex 05, France

L'IHES est un établissement public à caractère administratif, sous la tutelle des ministères en charge de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, prestataire de formation enregistré sous le n° 11 75 42988 75. cet enregistrement ne vaut pas agrément de l'État. Ses formations sont référencées dans **Datadock**.