

# Jumeau Numérique dans l'aéronautique légère pour l'intégration d'une pile à combustible

Hugo Tarlé, Samuel Arbousset (Beyond Aero), Nicolas Gardan (technocentre iNumLab de Micado)

## 1. Bref état de l'art

Un Jumeau Numérique (JN) est un modèle/outil permettant de relier un simulateur numérique à un objet physique en fonctionnement à l'aide de capteurs. Le simulateur numérique et l'objet physique se nourrissent mutuellement de données. Suivant le type de modèle de JN développé les liaisons peuvent se faire de manière synchrones (notamment à l'aide du Machine Learning ou Deep Learning) ou asynchrones. Le modèle est bien entendu supporté par un outil permettant la liaison numérique entre le simulateur numérique et l'objet physique afin de gérer les données des capteurs, l'application de correctifs éventuels sur l'objet physique (dans le cas d'une machine de production par exemple), l'analyse des données issues des simulations ... Le Jumeau Numérique est aussi couramment utilisé avec sa traduction anglaise : Digital Twin. Le terme Digital Twin est attribué à John Vickers de la NASA en 2002 et Michael Grieves du Florida Institute of Technology [1][2]. Un des premiers exemples référencés comme jumeau numérique est le programme Apollo notamment l'accident d'Apollo 13. Une réplique physique de la navette a ainsi permis aux ingénieurs sur terre de tester différentes simulations pour permettre le retour sains et saufs des 3 astronautes après l'explosion d'un réservoir à oxygène.

Au même titre que la simulation numérique (qu'il intègre) ou la fabrication additive, le JN fait partie des technologies clefs de l'industrie 4.0. Les gains possibles notamment dans le cadre de la maintenance prédictive peuvent être conséquents. La plupart des entreprises qui s'intéressent au JN le font sur 2 grandes avancées technologiques :

- L'intégration de la maintenance prédictive : la mise en place d'un JN couplé à de l'Intelligence Artificielle (IA) permet d'anticiper les pannes machines, vérifier les risques de collisions dans l'usinage à grande vitesse, ...
- L'intégration de la formation contextualisée : la formation des opérateurs est ainsi reliée à des données issues des capteurs et le simulateur numérique peut demander différents scénarii et perturber ces scénarii.

## Simulation Based Engineering

Le 20ème siècle sera pour la simulation le modèle de Simulation Based Engineering (SBE): essayer de simuler au mieux la réalité pour remplacer les essais physiques (on peut l'appeler le Virtual Twin). Les données en entrées du programme de simulation sont nominales et peu nombreuses.

On dispose donc de peu de données pour calibrer un modèle que l'on ne connaît pas bien. Cela donne forcément des différences entre la réalité et les modèles. Les chargements / conditions limites étant eux-mêmes nominaux, ils sont par essence éloignés de la réalité. Au vu des limitations du Virtual Twin, le monde de la simulation a décidé à un moment donné de descendre dans les ateliers.

L'intégration des chargements / conditions limites non nominales mais avec tout son historique est alors un premier pas vers le jumeau numérique.

Plusieurs limitations posent alors problème :

- les modèles étant très précis, ils sont très compliqués à mettre en œuvre et il est difficile de faire des allers-retours pour calibrer la simulation.
- la réalisation de calculs en temps réel (même si temps réel ne veut pas forcément dire obtenir le résultat immédiatement) est quasi impossible.

La notion de JN est alors arrivée pour résoudre ces problèmes. Toutes les données sont ainsi envoyées dans un modèle d'Intelligence Artificielle qui va se charger d'apprendre pour faire des prédictions (en liaison avec le modèle de simulation). La grande difficulté est la gestion des données : le coût des capteurs d'une part difficile à intégrer et le volume de données d'autre part (avec la notion de Big Data). Les algorithmes de l'IA sont ainsi très utilisés par les moteurs de recherche, les systèmes bancaires, ...

Plusieurs questions peuvent se poser : sont-ils adaptés au monde de l'ingénierie (on parle plus de Smart Data que de Big Data: on prend les données nécessaires et pas tous les points à chaque instant)? Comment certifier les données utilisées par ces algorithmes ? Doit-on abandonner les modèles de simulation basés sur des théories de la physique éprouvées ?

Pour répondre à toutes ces questions F. Chinesta propose un modèle hybride qui se situe entre le Virtual Twin (on mise presque tout sur le modèle de simulation et peu sur les données) et le Digital Twin (on mise presque tout sur les données et la gestion de l'IA et peu sur les modèles de simulation) [3]. Ce modèle appelé Hybrid Twin se base autant sur les modèles de simulation que sur la gestion des données (Smart Data) par l'IA. Le modèle de simulation doit être suffisamment cohérent sans être obligatoirement trop proche de la réalité, le modèle IA basé sur les données physiques va se charger de construire l'entre deux avec un modèle d'ignorance (écart entre le modèle et la réalité). Les avantages sont de pouvoir réduire le nombre de données et de certifier en se basant sur des modèles de simulation connus. Les inconvénients résident dans la difficulté à résoudre en temps réel les équations de la physique utilisées dans les modèles de données mais également dans le déploiement de nouvelles méthodes d'IA pour définir des systèmes apprenant qui se basent sur peu de données (les systèmes actuels se basent sur énormément de données). C'est un défi majeur pour les ingénieurs. Pour résoudre ce problème de résolution temps réel nécessaire au déploiement du jumeau numérique, [3] propose d'utiliser des abaques couplés à un modèle de simulation multi-critères.

### **Jumeau numérique et gestion du cycle de vie**

La description initiale d'un JN est la représentation virtuelle d'un objet physique dans le cadre de sa gestion du cycle de vie. L'encyclopédie du CIRP s'est avancée à une définition: "Un jumeau numérique est une représentation numérique d'un unique actif produit (appareil réel, objet, machine, service ou bien incorporel) ou système produit-service unique (un système constitué d'un produit et un service associé) qui comprend ses caractéristiques sélectionnées, propriétés, conditions et comportements au moyen de modèles, informations et données au sein d'un seul ou même sur plusieurs phases du cycle de vie" [4] [5].

L'avantage de cette définition est qu'elle apporte de la clarté sur les publications récentes qui mettent en avant l'association entre le JN et l'intelligence artificielle. Il devient ainsi courant de ne voir dans le JN que les développements intégrant des algorithmes d'IA. Les applications de JN avec de l'IA sont classées dans une catégorie des systèmes de contrôles avancés. Une liaison en temps réel entre l'objet physique et l'objet virtuel est bien entendu un avantage important d'un JN, dans ce cadre l'utilisation de l'IA est extrêmement intéressante notamment pour la maintenance prédictive. Les JN entrent dans le passage à l'usine 4.0, système global interconnecté encore appelé Smart Factories, et la volonté de relier les produits aux machines, les machines étant pilotées par des procédés physiques ou virtuels.

L'objectif de faire communiquer les capteurs, les systèmes informatiques, les moyens de production, est rendu possible par la forte évolution technologique de l'internet des objets et l'électronique associée. Rendre les entreprises plus agiles et plus proches du besoin du client doit être le résultat d'une Smart Factory, ce qui nécessite une maîtrise complète des différents processus, la mise en place d'automatisation, de robotisation, ... [6] Le JN est une composante essentielle de l'usine 4.0 au même titre que la fabrication additive, la simulation numérique ou encore l'intelligence artificielle. Les différentes prospectives par les cabinets d'experts estiment que plus de 50% des entreprises intégreront des JN d'ici 2026 et que la technologie serait mature d'ici 2030 [7]. L'utilisation d'outils de réalité augmentée et de réalité virtuelle permettent d'ajouter une dimension d'intégration évidente des opérateurs pendant les simulations.

[2] classent un JN en plusieurs catégories : un JN global qui décrit tous les niveaux d'un JN (du micro au macro), un JN prototype (JNP) qui décrit l'artefact du prototype physique, une instance de JN (JNI) qui décrit l'instance qui est le lien avec le produit tout au long de son cycle de vie et un environnement (JNE) qui espace multi-physique qui se charge des opérations sur les JNP/JNI. Dans cet environnement, les actions peuvent être prédictives ou interrogatives.

## Applications

Dans le domaine aérospatial, les JN sont utilisés pour produire énormément de données durant la durée de vie de l'avion pour anticiper les problèmes, la gestion de la maintenance, ... en s'appuyant sur les techniques de simulation. [8] ont proposé un modèle de simulation basé sur un JN pour surveiller les anomalies des pièces pour les applications aéronautiques et spatiales. [9] ont développé un JN sur un avion pour prédire les microfissures des structures composites à un stade précoce en utilisant une simulation intégrée et un système de gestion de la santé embarqué.

Dans l'industrie manufacturière, le JN est très présent mais principalement sous forme conceptuelle et de cas d'études. [10] propose une revue très stricte sur l'état de la recherche dans ce domaine avec une classification d'un JN :

- le DM (Digital Model): la liaison entre l'objet physique et l'objet virtuel n'est pas synchrone
- le DS (Digital Shadow): la liaison entre l'objet physique et l'objet virtuel est synchrone mais uniquement dans le sens objet physique vers objet virtuel [11]
- le JN (Digital Twin): la liaison est synchrone et bidirectionnelle entre l'objet physique et l'objet virtuel.

Les domaines de l'industrie manufacturière qui traitent d'un JN sont la planification et le contrôle de la production [12], la maintenance [13] [14], et l'organisation de l'usine [15]. Il existe beaucoup d'études (difficile d'être exhaustif) sur l'utilisation des JN pour améliorer les procédés de fabrication (recherche du 0 défaut, maintenance prédictive, ...): applications dans la soudure [16], la commande numérique [17] [18] [19] ou encore la fabrication additive [20] [21] [22] [23] [24]...

Dans le domaine médical, les JN sont également très présents. Le JN est déjà très utilisé dans le cadre de la formation ou de la préparation d'interventions chirurgicales. Un exemple industriel issu de résultats de recherches (IRCAD-université de Strasbourg) est la solution Visible Patient qui permet de créer un double numérique en 3D de l'organe à opérer, le praticien peut ainsi analyser le modèle 3D tel qu'on le ferait sur un outil de CAO (mesures, coupes, ...) pour préparer une intervention [25]. Un certain nombre de règles métiers permet d'assister le praticien en reconnaissant automatiquement la localisation exacte d'une lésion, en calculant et en simulant une marge de sécurité, deux fois plus grande que le diamètre de la tumeur (qui est représentée par un halo jaune autour de la tumeur), en simulant des résections virtuelles, également issu de résultats de recherches du CNRS, Anatoscope

utilise également les données de l'imagerie médicale pour développer des prothèses personnalisées en fonction des caractéristiques de chaque patient [26]. Le système est notamment basé sur la plateforme libre SOFA [27], architecture visant à travailler sur des simulations en temps réel pour des applications médicales [28] [29].

Dans le domaine du médicament, l'utilisation de JN permet de tester les molécules et leurs effets sur le corps humain. La vérification de l'efficacité des molécules dans la simulation d'un patient virtuel soumis à plusieurs états (sain ou pathologique) permet d'accélérer les phases de développement des traitements en réduisant notamment les phases de test. La multiplication de récolte des données pose de nombreuses questions éthiques [30] notamment concernant la confidentialité et les règles liées à la récolte de ces données. Il est certain que les essais cliniques et les formations des praticiens vont être fortement impactés dans les années futures par l'intégration de JN : on parle du passage d'essais in vivo à des essais in silico avec les mêmes objectifs que pour des essais mécaniques classiques : réduire le nombre de tests et les risques d'erreurs. On ne parle plus de maintenance prédictive mais de médecine prédictive.

### **Synthèse**

Au cœur d'un JN, on a dans la majorité des cas un modèle 3D qui représente l'avatar numérique du modèle physique. En se basant sur le format STEP, [31] proposent un modèle qui permet d'améliorer la représentation géométrique du jumeau numérique. À partir de la représentation géométrique et des dimensions réelles enregistrées lors du contrôle qualité, le procédé proposé génère une représentation géométrique telle que fabriquée du composant physique associé. La représentation virtuelle est ainsi le miroir de l'objet physique. [32] proposent une représentation hybride d'assemblages avec une mise à jour du modèle virtuel à partir d'acquisitions en utilisant du machine learning. Le modèle géométrique est basé également sur une représentation exacte type BREP pour une intégration aisée dans les systèmes de CAO.

Un point important est la gestion des multitudes de données que peuvent envoyer les capteurs. Le big data doit apporter des réponses aux problèmes inhérents. L'Intelligence Artificielle avec le machine learning et le deep learning permet de fournir des ensembles de données très importants. Les algorithmes de machine learning [33] nécessitent une intervention du Data Scientist pour extraire les variables qu'il estime importantes des données recueillies (ce choix appelé Feature Extraction influence forcément la prédiction) alors que les algorithmes de Deep Learning [34] [35] utilisent des données non structurées. Ils sont basés sur des réseaux de neurones (capables de mimer le cerveau humain) qui nécessitent des volumes de données très importants [36]. Cette contrainte impacte le JN en cas d'échanges d'informations synchrones entre l'objet physique et sa reproduction virtuelle. Ces technologies sont très présentes dans le cadre de la maintenance prédictive. Elles permettent d'anticiper des comportements avant qu'ils ne se produisent réellement.

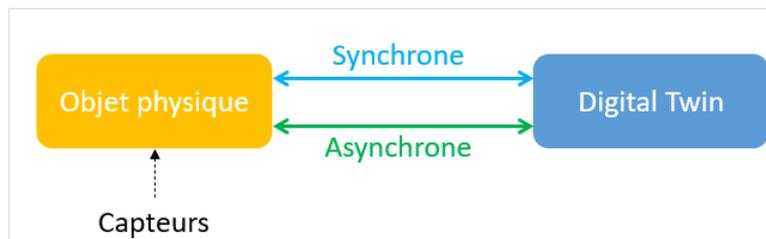
L'impact de l'intégration d'un JN sur les démarches méthodologiques n'est pas à négliger. Le manque de publications sur ces aspects méthodologiques est assez flagrant, les recherches se focalisent sur la mise en place de preuves de concept pour appréhender les difficultés de mise en place d'un JN (ce qui se rapproche bien de notre approche inductive). Les domaines d'applications étant vastes et le nombre de paramètres très important, il est difficile d'identifier des méthodologies globales applicables partout même si certaines recherches visent à présenter une approche holistique [37]. L'ingénierie des systèmes basée sur les modèles (MBSE Model Based System Engineering en anglais) propose une réponse à cette problématique, au moins pour les applications d'ingénierie. Un modèle MBSE permet de décrire les caractéristiques structurelles et les interdépendances d'un produit mécatronique. Généralement combiné avec des langages de modélisation comme SysML (langage de modélisation

graphique dérivé d'UML), un modèle MBSE permet de gérer la grande complexité des systèmes de type JN [38]. Cette modélisation pour le moment paramétrique, plutôt dédiée aux avancées de phases en conception, permet de décrire la physique du système (avec les aspects structurels, thermiques, électriques, ...) et de réaliser des simulations pour anticiper le comportement du produit décrit. L'adoption de l'approche MBSE permet d'améliorer la collaboration entre les différentes équipes et s'inscrit ainsi pleinement comme "outil" du JN [39]. Cependant cette description d'une problématique par une représentation objet n'est pas sans poser des difficultés aux ingénieurs non formés à la modélisation UML ou la programmation objet.

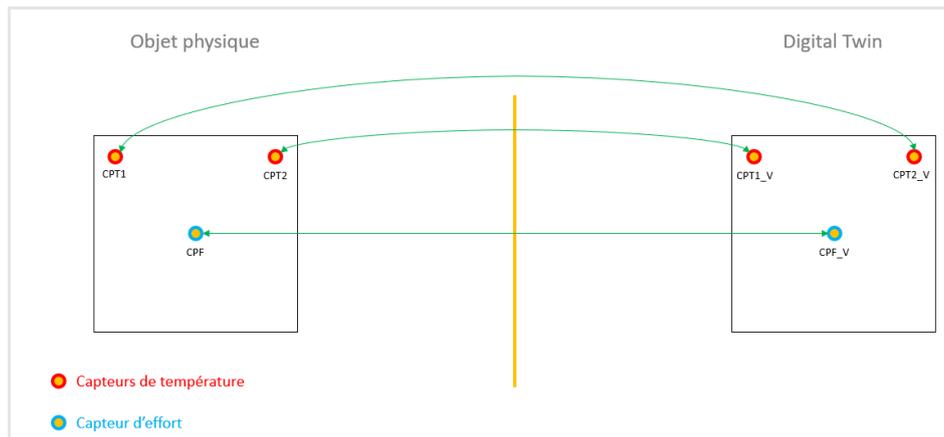
## 2. Méthodologie

Le JN est à la base un concept relativement simple mais qui nécessite une mise en place rigoureuse (qualification/certification) et collaborative. Sur ce dernier point on retrouve les mêmes problèmes que dans le PLM. Le PLM pose de nombreux problèmes, encore à l'heure actuelle, d'intégration dans les entreprises. Nous défendons dans ce cadre une approche plus inductive du JN. C'est d'ailleurs une réalité depuis des décennies. Le JN existe depuis longtemps dans sa version la plus simple : on mesure un ensemble de comportements d'un objet physique à l'aide de capteurs, une reproduction virtuelle permet de reproduire ce comportement et qualifie ainsi par la qualité de cette reproduction. Cette méthode est par exemple très utilisée dans le domaine de l'électronique (chez Schneider Electric notamment) pour qualifier un modèle virtuel et faire varier les différents paramètres créant des nouvelles instances de reproduction virtuelle qui sont elles-mêmes qualifiées sans repasser par des mesures sur l'objet physique.

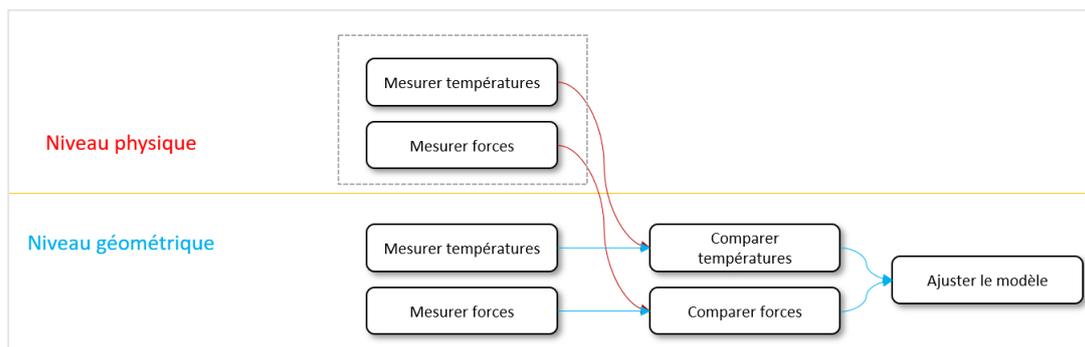
La description initiale d'un JN est la représentation virtuelle d'un objet physique dans le cadre de sa gestion du cycle de vie. Un JN n'est en effet pas forcément doté d'une IA sur des échanges synchrones. Notre définition d'un JN est la suivante : il s'agit d'un objet physique couplé à un simulateur virtuel avec des informations qui circulent entre les deux, informations captées par des capteurs sur l'objet physique.



La démarche inductive qui consiste à réaliser des preuves de concept pour en tirer des bonnes pratiques est la colonne vertébrale du technocentre iNumLab. Cette approche nous permet au travers de nos accompagnements PME d'extraire des cas concrets que l'on confronte à une démarche scientifique (étude de l'existant notamment). Nous adoptons la méthodologie P4LM [40] sur laquelle nous travaillons depuis de nombreuses années. Les cas traités pour le moment par le technocentre concernent dans la grande majorité des échanges asynchrones. Ces échanges sont bidirectionnels, pas forcément de manière automatique mais sous forme de valeurs des paramètres pour indiquer à l'objet physique la valeur simulée. Prenons par exemple le schéma simple d'un JN présenté à la figure suivante : un objet physique qui contient 3 capteurs : 1 d'effort résultant et 2 de températures. Le JN reproduit le positionnement des capteurs pour la création des capteurs virtuels et capter les résultats des simulations (par exemple thermomécaniques). Partons du principe qu'un test de traction est réalisé sur l'objet physique, reproduit sur le JN. L'objectif du JN est de pouvoir qualifier un JN grâce au couplage avec les capteurs puis de réaliser des ensembles de simulations sur des modifications maîtrisées du JN, chaque version du JN créée étant qualifiée sans avoir à réaliser de nouveaux tests physiques.

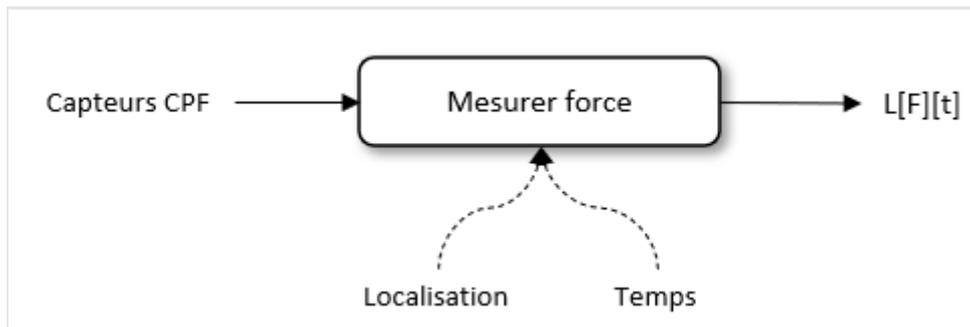


La mise en place de la méthodologie P4LM permet de préparer le projet ainsi que le cahier des charges en organisant les différents paramètres. Dans le cadre de l'exemple simple présenté ci-dessus (le projet), les produits sont l'objet physique et le JN, les procédés sont les capteurs. Comme on l'a décrit plus haut, il y a plusieurs niveaux de description dans P4LM pour le projet, le processus, le produit et le procédé (au sens large) : au niveau du développement de JN nous en définissons 2 : physique et numérique. Le projet consiste à calibrer un modèle de calcul sur la base de mesures afin de réaliser un ensemble de calculs qualifiants. Le produit est un objet physique en niveau physique et une maquette numérique dans le niveau numérique. Les procédés sont des capteurs au niveau physique et de la simulation thermomécaniques au niveau numérique (voir figure suivante).

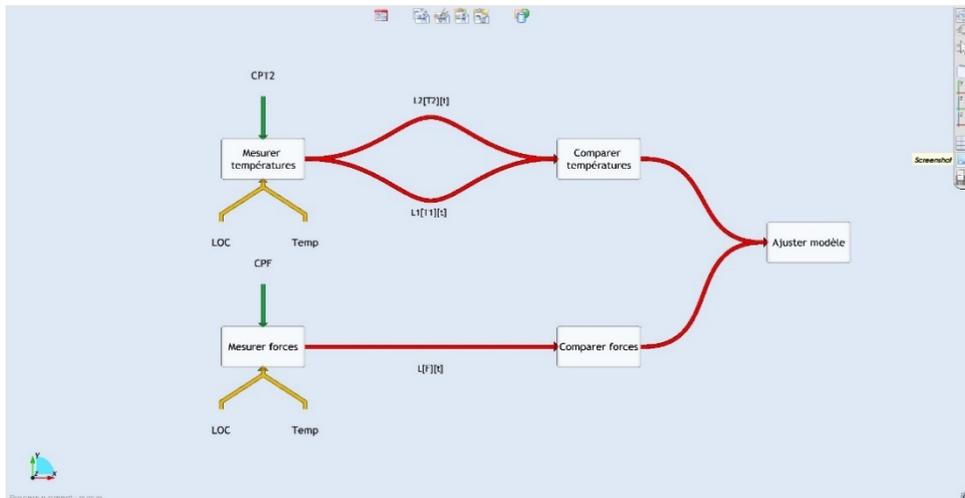


Pour chaque procédé la méthodologie P4LM précise les entrées / sorties. Par exemple si on zoom sur le procédé Mesurer pressions du niveau physique (voir suivante) :

- En entrée : les sorties des capteurs
- En sortie : des listes correspondantes au valeurs mesurées (force en fonction du temps)
- En contraintes :
  - la localisation du point P selon la référence
  - le temps



Dans le cadre du développement de l'outil DFX@Manager décrit précédemment l'utilisateur peut décrire les différents processus sur plusieurs niveaux en créant les procédés selon la méthodologie établie (voir figure suivante).



Lors de la création d'un procédé, un assistant permet de décrire le procédé à appliquer sous la forme d'une Expression GraphoNumérique comme présenté Figure 1.

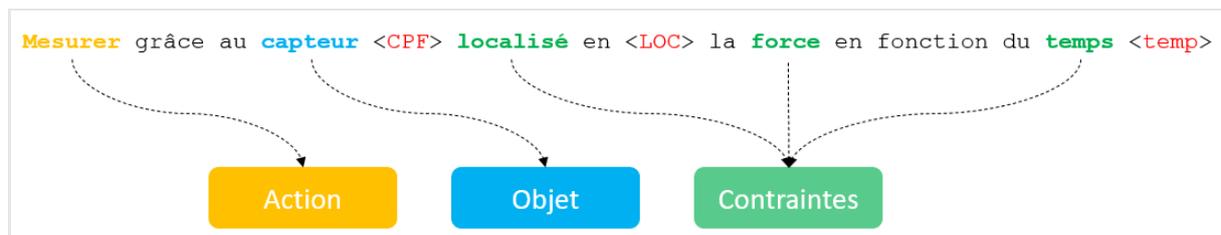
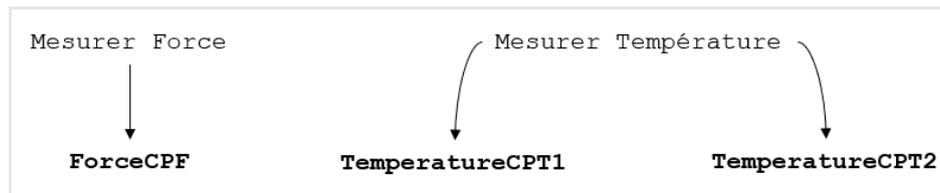


Figure 1 : exemple d'Expression GraphoNumérique

Le résultat informatique de cette expression est double :

- création d'une fonction **MesurerForce** (Loc1, CPF) : L[F] [t]
- création d'un paramètre GraphoNumérique **ForceCPF**

L'utilisation de cette méthodologie permet de créer un modèle de connaissance avec une terminologie établie et validée par les participants au projet (les différents termes représentant les actions, objets et contraintes sont au préalable enregistré dans une BDD). Le graphe des paramètres graphonumériques permet de visualiser le graphe de liaison entre les paramètres pour 2 niveaux : le niveau physique et le niveau virtuel. La correspondance des noms entre le niveau physique et le niveau virtuel est ainsi cohérent.



### 3. Application à l'avionique légère avec le projet Blériot

[1] M. Grieves et J. Vickers, « Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems », in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, et A. Alves, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2017, p. 85-113.

[2] David Jones, Chris Snider, Aydin Nassehi, Jason Yon, Ben Hicks, « Characterising the Digital Twin: A systematic literature review », *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 29, Part A, 2020, Pages 36-52, ISSN 1755- 5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.

[3] F. Chinesta, E. G. CUETO, E. Abisset-Chavanne, J. L. DUVAL, et F. E. KHALDI, « Virtual, Digital and Hybrid Twins: A New Paradigm in Data-Based Engineering and Engineered Data », *Arch. Comput. Methods Eng.*, 2019, doi: 10.1007/s11831-018-9301-4.

[4] Elisa Negri, Luca Fumagalli, Marco Macchi, A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems, *Procedia Manufacturing*, Volume 11, 2017, Pages 939-948, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>.

[5] R. Stark et T. Damerou, « Digital Twin », in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, S. Chatti et T. Tolio, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer, 2019, p. 1-8.

[6] « Jumeau numérique : la digitalisation du monde est en cours ! », Unitec, déc. 12, 2019. <https://www.unitec.fr/jumeau-numerique-la-digitalisation-du-monde-est-en-cours/> (consulté le sept. 02, 2020).

[7] Brian Burke, Nick Heudecker, Svetlana Sicular , Sylvain Fabre., « Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2020 ». Gartner Report, 2020.

[8] E. Glaessgen et D. Stargel, « The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles », in *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 0 vol., American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012

[9] Reifsnider, KI & Majumdar, Prasun. (2013). Multiphysics Stimulated Simulation Digital Twin Methods for Fleet Management. *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 10.2514/6.2013-1578.

[10] Werner Kritzing, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, Wilfried Sihn, Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, *IFAC- PapersOnLine*, Volume 51, Issue 11, 2018, Pages 1016-1022, ISSN 2405- 8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.

- [11] A. Ladj, Z. Wang, O. Meski, F. Belkadi, M. Ritou, et C. Da Cunha, « A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective », *Journal of Manufacturing Systems*, août 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.07.018
- [12] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo, et K. D. Bettenhausen, « About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing », *IFAC-Pap.*, vol. 48, no 3, p. 567-572, janv. 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
- [13] D. M. D'Addona, A. M. M. S. Ullah, et D. Matarazzo, « Tool-wear prediction and pattern-recognition using artificial neural network and DNA-based computing », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 28, no 6, p. 1285-1301, août 2017, doi: 10.1007/s10845-015-1155-0.
- [14] G. A. Susto, A. Schirru, S. Pampuri, S. McLoone, et A. Beghi, « Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach », *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 11, no 3, p. 812-820, juin 2015, doi: 10.1109/TII.2014.2349359.
- [15] T. H.-J. Uhlemann, C. Schock, C. Lehmann, S. Freiberger, et R. Steinhilper, « The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems », *Procedia Manuf.*, vol. 9, p. 113-120, janv. 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.043
- [16] A. Papacharalampopoulos, P. Stavropoulos, et D. Petrides, « Towards a digital twin for manufacturing processes: applicability on laser welding », *Procedia CIRP*, vol. 88, p. 110-115, janv. 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.020.
- [17] W. Luo, T. Hu, Y. Ye, C. Zhang, et Y. Wei, « A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 65, p. 101974, oct. 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2020.101974.
- [18] Y. Wei, T. Hu, T. Zhou, Y. Ye, et W. Luo, « Consistency retention method for CNC machine tool digital twin model », *Journal of Manufacturing Systems*, juin 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.002.
- [19] C.-P. Wang, K. Erkorkmaz, J. McPhee, et S. Engin, « In-process digital twin estimation for high-performance machine tools with coupled multibody dynamics », *CIRP Annals*, vol. 69, no 1, p. 321-324, janv. 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.047.
- [20] L. Scime, D. Siddel, S. Baird, et V. Paquit, « Layer-wise anomaly detection and classification for powder bed additive manufacturing processes: A machine-agnostic algorithm for real-time pixel-wise semantic segmentation », *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101453, déc. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101453.
- [21] Y. Cai, Y. Wang, et M. Burnett, « Using augmented reality to build digital twin for reconfigurable additive manufacturing system », *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 56, p. 598-604, juill. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.04.005.
- [22] C. Mandolla, A. M. Petruzzelli, G. Percoco, et A. Urbinati, « Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain: A case analysis of the aircraft industry », *Computers in Industry*, vol. 109, p. 134-152, août 2019, doi: 10.1016/j.compind.2019.04.011.
- [23] C. Liu, L. Le Roux, C. Körner, O. Tabaste, F. Lacan, et S. Bigot, « Digital Twin-enabled Collaborative Data Management for Metal Additive Manufacturing Systems », *Journal of Manufacturing Systems*, mai 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.05.010.
- [24] G. L. Knapp et al., « Building blocks for a digital twin of additive manufacturing », *Acta Materialia*, vol. 135, p. 390-399, août 2017, doi: 10.1016/j.actamat.2017.06.039.

- [25] A. Seguin-Givelet, M. Grigoroiu, E. Brian, et D. Gossot, « Planning and marking for thoracoscopic anatomical segmentectomies », *J. Thorac. Dis.*, vol. 10, no 10, Art. no 10, mars 2018, doi: 10.21037/jtd.2018.02.21.
- [26] A. H. Dicko, N. Tong-Yette, B. Gilles, F. Faure, et O. Palombi, « Construction and Validation of a Hybrid Lumbar Spine Model For the Fast Evaluation of Intradiscal Pressure and Mobility », *Int. Sci. Index Med. Health Sci.*, vol. 9, no 2, p. 134-145, févr. 2015.
- [27] F. Faure et al., *SOFA: A Multi-Model Framework for Interactive Physical Simulation*, vol. 11. Springer, 2012, p. 283-321.
- [28] S. Nikolaev et S. Cotin, « Estimation of boundary conditions for patient-specific liver simulation during augmented surgery », *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, vol. 15, no 7, p. 1107-1115, mai 2020, doi: 10.1007/s11548-020-02188-x.
- [29] H. Courtecuisse et al., « Three-dimensional physics-based registration of pelvic system using 2D dynamic magnetic resonance imaging slices », *Strain*, vol. 56, no 3, juin 2020, doi: 10.1111/str.12339.
- [30] K. Bruynseels, F. Santoni de Sio, et J. van den Hoven, « Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm », *Front. Genet.*, vol. 9, févr. 2018, doi: 10.3389/fgene.2018.00031.
- [31] S. Haag et R. Anderl, « Automated Generation of as-manufactured geometric Representations for Digital Twins using STEP », *Procedia CIRP*, vol. 84, p. 1082-1087, janv. 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.305.
- [32] J.-L. Grégorio, C. Lartigue, F. Thiébaud, et R. Lebrun, « A digital twin- based approach for the management of geometrical deviations during assembly processes », *Journal of Manufacturing Systems*, mai 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.04.020.
- [33] K. Dröder, P. Bobka, T. Germann, F. Gabriel, et F. Dietrich, « A Machine Learning-Enhanced Digital Twin Approach for Human-Robot-Collaboration », *Procedia CIRP*, vol. 76, p. 187-192, janv. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.02.010.
- [34] C. Zhang, G. Zhou, J. Hu, et J. Li, « Deep learning-enabled intelligent process planning for digital twin manufacturing cell », *Knowl.-Based Syst.*, vol. 191, p. 105247, mars 2020, doi: 10.1016/j.knosys.2019.105247.
- [35] K. Xia et al., « A digital twin to train deep reinforcement learning agent for smart manufacturing plants: Environment, interfaces and intelligence », *J. Manuf. Syst.*, juill. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.012.
- [36] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, et C. Barlow, « Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research », *IEEE Access*, vol. 8, p. 108952-108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [37] D. Thomas, A. Hristo, M. Patrick, J. C. Göbel, et F. Sven, « A Holistic System Lifecycle Engineering Approach – Closing the Loop between System Architecture and Digital Twins », *Procedia CIRP*, vol. 84, p. 538-544, janv. 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.257.
- [38] Brusa, Eugenio, Calà, Ambra, Ferretto, Davide « *Systems Engineering and Its Application to Industrial Product Development* | | Springer 2018

[39] J. Masiar, B. Schneider, M. Kürümlüoğlu, et O. Riedel, « Beyond Model- Based Systems Engineering towards Managing Complexity », *Procedia CIRP*, vol. 91, p. 325-329, janv. 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.183.

[40] Frédéric Danesi, Nicolas Gardan, Yvon Gardan, Michael Reimeringer, P4LM: A methodology for product lifecycle management, *Computers in Industry*, Volume 59, Issues 2–3, 2008, Pages 304-317, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.06.013>.