



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

SIMPPÉ



École Doctorale SIMPPE - Sciences et Ingénierie des Molécules des Produits des Procédés et de l'Énergie

Laboratoire ERPI – Équipe de Recherche sur les Processus Innovatifs

Thèse présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Mention : Génie des Systèmes Industriels

Par **Guillaume PRONOST**

**« Contributions du jumeau numérique pour une
conception et une fabrication centrées sur le produit pour
une approche DIT (Do-It-Together) »**

Soutenue publiquement le 10 Octobre 2024

Membres du jury :

Président du jury :	Pr. Cédric JOIN	Professeur des Universités, CRAN, Université de Lorraine
Directeur de thèse :	Pr. Mauricio CAMARGO	Professeur des Universités, ERPI, Université de Lorraine
Co-Directeur de thèse :	Dr. Frédérique MAYER	Maître de Conférence HDR, ERPI, Université de Lorraine
Rapporteurs :	Pr. Nabil ANWER	Professeur des Universités, LURPA, ENS Cachan
	Pr. Nathalie JULIEN	Professeur des Universités, Lab-STICC, Université de Bretagne Sud
Examineurs :	Dr. Nicolas MARANZANA	Maître de Conférence HDR, LCPI, ENSAM
	Dr. Olivia PENAS	Ingénieur de recherche HDR, Quartz, ISAE-SUPMECA
	Dr. Laurent DUPONT	Ingénieur de recherche, ERPI, Université de Lorraine



INEDIT
open INnovation Ecosystems
for Do It Together process

This project has received co-funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under Grant Agreement No. 869952



LORRAINE
INP Ensgsi
NANCY

“S’il n’y a pas de solution c’est qu’il n’y a pas de problème.”

Jacques Rouxel – *Les Shadoks*

Résumé

Ce travail de thèse porte sur l'utilisation du Jumeau Numérique comme une technologie pour une application en temps-réel du paradigme du « Système Contrôlé par le Produit » (SCP) à la conception et la fabrication collaborative d'un produit par impression 3D.

Cette thèse s'appuie sur les résultats du projet européen INEDIT, qui visait à explorer et promouvoir l'innovation collaborative dans le secteur de la fabrication, en s'appuyant sur l'approche DIT (Do-It-Together) inspirée notamment du social-manufacturing pour dépasser l'approche DIY (Do-It-Yourself). Ces approches permettent de stimuler l'innovation et la co-création dans les écosystèmes de fabrication, ici appliqués au secteur de l'ameublement. Le projet a montré que l'utilisation de technologies de prototypage comme l'impression 3D permet une vision tangible du produit tout au long du processus, soutenant une approche collaborative en permettant un contrôle continu et une validation des modèles métiers pendant la conception. D'autre part, les travaux de McFarlane sur le Système Contrôlé par le Produit (SCP) ont mis en évidence qu'une observation directe du produit pendant sa fabrication permettrait une validation de celle-ci par le produit défini en phase de conception. Cependant, une rupture de continuité se produit entre la phase de co-conception et la phase de fabrication, où la visualisation et l'interaction avec le produit sont limitées, compromettant le caractère collaboratif.

Dans le cadre de cette thèse, nous explorons l'utilisation d'un Jumeau Numérique comme un moyen d'observabilité en temps réel de la réalité physique d'un produit durant toute sa phase de fabrication, et nous implémentons un contrôle du système de production basé sur cette réalité physique et ses exigences de conception. L'originalité de ce travail est de faire du produit l'orchestrateur de cette ingénierie collaborative dont la représentation numérique en temps réel permet d'envisager de faire face à des situations de fabrication non perçues par la conception.

Pour valider ce principe, un cas d'expérimentation portant sur la fabrication additive d'un produit a été mis en place. Il permet de mettre en évidence l'intérêt d'une observabilité directe de l'état physique du produit, et en particulier son état thermique à travers la mesure de sa température, pour en modéliser la dynamique et permettre le contrôle de l'outil de production par des exigences d'usage du produit vis-à-vis de sa résistance.

Cependant, pour satisfaire cette exigence, il est nécessaire d'approfondir cette dynamique par une modélisation (par l'utilisation de modèles comportementaux ou de modèles structurels) du comportement thermique du produit concerné pour pouvoir observer et contrôler des phénomènes

d'influence sur la résistance du produit. Une limitation de cette approche réside dans le besoin d'aller au-delà de l'observation de simples données brutes pour véritablement comprendre le comportement physique du produit en cours de fabrication. Pour remédier à cette limitation, un modèle physique du comportement thermique du produit a été proposé afin d'observer et de contrôler son état physique pendant la fabrication.

Abstract

This thesis focuses on the use of the Digital Twin as a technology for the real-time application of the "Product-Driven Control System" paradigm to the collaborative design and manufacturing of a product through 3D printing. This thesis is based on the results of the European project INEDIT, which aimed to explore and promote collaborative innovation in the manufacturing sector by leveraging the DIT (Do-It-Together) approach, inspired particularly by social manufacturing to surpass the DIY (Do-It-Yourself) approach. These approaches stimulate innovation and co-creation in manufacturing ecosystems, applied here to the furniture sector. The project demonstrated that the use of prototyping technologies such as 3D printing provides a tangible vision of the product throughout the process, supporting a collaborative approach by allowing continuous control and validation of business models during design. Furthermore, McFarlane's work on the Product-Controlled System highlighted that observing the product during manufacturing enables validation of the process by the product defined in the design phase. However, a continuity gap exists between the co-design phase and the manufacturing phase, where visualization and interaction with the product are limited, compromising the collaborative nature.

In this thesis, we explore the use of a digital twin as a means of real-time observability of the physical reality of a product throughout its manufacturing phase, and we implement a production system control based on this physical reality and its design requirements. The originality of this work lies in making the product the orchestrator of this collaborative engineering, with its real-time digital representation allowing us to address unforeseen manufacturing situations during the design phase.

To validate this principle, an experimental case study on the additive manufacturing of a product was implemented. This highlighted the interest in direct observability of the physical state of the product, particularly its thermal state through temperature measurement, to model its dynamics and control the production tool based on the product's usage requirements in terms of its strength.

However, to meet this requirement, it is necessary to deepen this dynamic through modeling (using behavioral or structural models) of the thermal behavior of the concerned product to observe and control phenomena influencing the product's strength. A limitation of this approach is the need to go

beyond the observation of simple raw data to truly understand the physical behavior of the product during manufacturing. To address this limitation, a physical model of the product's thermal behavior has been proposed to observe and control its physical state during manufacturing.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes plus profonds remerciements à toutes les personnes qui m'ont accompagné lors de la réalisation de cette thèse et de ce manuscrit. Ce travail est le fruit de nombreuses années de recherche, de soutien, et d'encouragements, sans lesquels il n'aurait jamais vu le jour.

Tout d'abord, je tiens à remercier mes encadrants de thèse, Mauricio Camargo et Frédérique Mayer, pour leur soutien indéfectible et les conseils qu'ils ont su me prodiguer durant ces années de thèse. Chaque discussion avec vous m'a poussé à envisager de nouvelles pistes de réflexion, à remettre en perspectives mes travaux, et de manière générale à développer ma posture de chercheur.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du jury, Nabil Anwer, Nathalie Julien, Cédric Join, Nicolas Maranzana, et Olivia Penas, pour l'honneur qu'ils me font en examinant ce manuscrit. Leurs commentaires seront de précieux outils pour améliorer et développer plus avant ce travail de recherche.

Je remercie également Laurent Dupont, membre du jury, pour ses contributions à ma thèse en tant que collègue, relecteur, et également en tant que pilote pour l'Université de Lorraine du projet INEDIT¹ à travers lequel une partie de ma thèse a été financée.

Merci à Hakim Boudaoud, Benjamin Ennesser-Serville, Olivier Farges, Cédric Join, Brunelle Marche, Gérard Morel, Léa Penazzi et tous les autres qui ont joué un rôle dans la réalisation de cette thèse. Vos contributions ont été essentielles à la réussite de ces travaux.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues et amis du laboratoire ERPI pour leur soutien moral et leurs précieux conseils tout au long de ces années. En particulier, je tiens à remercier mes compagnons de bureau, Benjamin, Brice, Corentin, Fanny, Jose, Mathilde, Paco, pour leur amitié, leurs rires, et surtout pour avoir réussi à me supporter durant ces années de doctorat. Votre résilience est impressionnante.

Je remercie également mes collègues de l'ENSGSI pour leur accueil, ainsi que toute l'équipe de direction pour la confiance qu'ils ont accordé à un jeune doctorant qui faisait ses premières armes en

¹ Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 869952. DOI : [10.3030/869952](https://doi.org/10.3030/869952)

tant qu'enseignant. J'espère toujours me montrer digne de cette confiance et participer d'autant plus dans les années futures au développement de cette école.

Je n'oublie pas mes anciens camarades d'école, en particulier Alexis, Benjamin, Gauthier, Hugo, Julian et Pascal, pour leur amitié et leurs encouragements. Nous sommes tous partis faire une thèse dans des villes différentes, mais les souvenirs partagés et les quelques périodes de retrouvailles ont été une source de réconfort et de motivation tout au long de cette aventure.

Je remercie également mes amis proches, Adrien, Arthur, Gaëtan, Guillaume, Kevin, Lucas, Lucas, et Nathan, qui ont su m'épauler et être toujours présents pour me changer les idées. Merci à vous d'avoir parfois (souvent) accepté d'écouter mes divagations scientifiques. J'espère pouvoir vous retrouver tous à ma soutenance pour enfin comprendre le fameux « jumeau maléfique » avec qui je me bats depuis le début de ma thèse.

Des remerciements tout particuliers vont à mon meilleur ami, Raphaël. Ton soutien, tes conseils et ta présence ont été d'une valeur inestimable. Ta capacité à me remonter le moral et à m'encourager à persévérer m'a beaucoup aidé.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à ma famille, en particulier à mes parents, Sylvie et Alain, pour leur amour et leur soutien inconditionnel. Leurs encouragements m'ont porté durant les moments les plus difficiles de ma vie et en particulier de ce parcours. Merci d'être toujours un pilier sur lequel je peux me reposer.

Enfin, je dédie cette thèse à ma compagne, Louise. Ta présence à mes côtés, tant dans les moments de joie que dans les moments de doute, m'a donné la force et la motivation nécessaires pour mener à bien ce travail. Merci pour tout.

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract	4
Remerciements	7
Table des matières	9
Table des illustrations	15
Introduction générale et démarche de réflexion	19
Chapitre 1. Ingénierie collaborative pour la conception d'un produit.....	25
1.1 Introduction du chapitre 1	26
1.2 Contextualisation du sujet de thèse	27
1.2.1 Présentation du projet européen INEDIT	27
1.2.2 Contexte de l'étude : convergence des approches DIY et DIT.....	28
1.3 L'approche « Do-It-Together » : Concept et applications.....	31
1.3.1 Le Do-It-Together.....	31
1.3.2 Implications des différentes parties prenantes dans le processus DIT	32
1.4 Limites du Do-It-Together pour une pratique interdisciplinaire en conception et en fabrication	35
1.4.1 Limites de l'application du Do-It-Together et phase de co-conception	35
1.4.2 Limites de l'application du Do-It-Together et phase de fabrication.....	36
1.5 Conclusion.....	38
Chapitre 2. Le Jumeau Numérique, un outil pour l'ingénierie collaborative	41
2.1 Introduction du chapitre 2	42
2.2 Le Jumeau Numérique : définition, composition et applications	43
2.2.1 Le concept de Jumeau Numérique : origine et définitions en recherche et en industrie.....	43

2.2.2	Vers une étude de la composition et une classification des Jumeaux Numériques	45
2.2.2.1	Détermination des critères de classification	46
2.2.2.2	Hypothèses retenues pour la classification	46
2.2.2.3	Réalisation d'un arbre de décision pour la classification des jumeaux numériques 47	
2.3	Jumeau Numérique et pratiques collaboratives en phase de conception	51
2.3.1	Le Jumeau Numérique comme outil pour les pratiques collaboratives.....	51
2.3.2	Le Jumeau Numérique comme plateforme pour la collaboration	53
2.4	Usage du Jumeau Numérique pour faciliter une collaboration en phase de fabrication....	55
2.4.1	Le Jumeau Numérique comme objet intermédiaire de fabrication collaborative	55
2.4.2	Limites de l'application du Jumeau Numérique pour des pratiques collaboratives en fabrication.....	56
2.5	Conclusion.....	58
Chapitre 3.	Approches d'Observabilité du flux circulant de produit et système contrôle par le produit	59
3.1	Introduction du chapitre 3.....	60
3.2	Intelligence du produit et produits intelligents	61
3.2.1	Produits Intelligents : concepts	62
3.2.2	Intelligences du produit : concepts	63
3.2.3	Intelligent beings : concepts.....	64
3.2.4	Applications des produits intelligents	66
3.3	Produit intelligent et système contrôlé par le produit	69
3.3.1	Application des produits intelligents au contrôle et paradigme du Système Contrôlé par le Produit	69
3.3.2	Observabilité d'un produit	72
3.3.3	Limites de l'observabilité du produit pour le paradigme du Système contrôlé par le Produit	73

3.4	Application du paradigme du système contrôlé par le produit au suivi d'un produit pendant le processus de production/fabrication : utilisation du Jumeau Numérique	75
3.4.1	Méthodologie d'application du Jumeau Numérique pour l'observabilité du produit	75
3.4.2	Usage du Jumeau Numérique comme outil pour le paradigme du système contrôlé par le produit	80
3.5	Conclusion.....	82
Chapitre 4.	D'un produit à faire.....	83
4.1	Introduction du chapitre 4.....	84
4.2	Expérimentation – Etude d'un processus de fabrication additive.....	84
4.2.1	Choix d'une technologie pour l'expérimentation : la fabrication additive	84
4.2.2	Implémentation du SCP à l'impression 3D - concepts.....	87
4.3	Définition des parties de l'état interne de notre produit à étudier.....	90
4.3.1	Choix d'un critère d'analyse de la pièce finale	90
4.3.2	Observabilité en temps réel de la résistance mécanique d'une pièce pendant sa fabrication.....	91
4.4	Identification des variables à observer permettant de déterminer l'état interne du produit	93
4.4.1	Identification des phénomènes physiques permettant de décrire l'état interne du système.....	93
4.4.2	Etude des phénomènes physiques influant sur la liaison inter-couches.....	94
4.4.2.1	Conduction thermique.....	94
4.4.2.2	Convection thermique	95
4.4.2.3	Rayonnement thermique.....	95
4.4.3	Visualisation et contrôle des paramètres influant sur la liaison inter-couches	96
4.5	Implémentation d'une observabilité directe en temps réel de la température du filament au cours de la fabrication.....	99
4.5.1	Présentation de l'équipement utilisé dans cette expérimentation	99
4.5.2	Mesures avec la caméra thermique : identification de la température de l'extrudeur	101

4.5.3	Développement d'un module d'acquisition de données de température en temps réel	102
4.6	Conclusion.....	106
Chapitre 5.	...A un système contrôle par le produit... ..	109
5.1	Introduction du chapitre 5.....	110
5.2	Détermination empirique d'un modèle de la température d'extrusion d'une imprimante 3D	111
5.2.1	Collecte des données expérimentales.....	112
5.2.2	Identification d'un premier modèle statique linéaire	113
5.3	Identification d'un modèle dynamique de la température du filament extrudé	115
5.3.1	Détermination du comportement de la buse de l'imprimante.....	115
5.3.2	Détermination du comportement du filament extrudé.....	118
5.3.3	Détermination du modèle global du comportement de l'imprimante et du fil extrudé	120
5.4	Implémentation d'un système de contrôle en temps réel de la température d'extrusion de l'imprimante 3D	122
5.4.1	Architecture du système de contrôle	122
5.4.2	Implémentation du contrôleur	123
5.4.3	Optimisation d'un contrôle multi paramètres	125
5.5	Application du contrôle en temps réel pour la commande de l'imprimante 3D par le produit	127
5.5.1	Construction de l'algorithme d'asservissement en temps réel de l'imprimante centré sur le produit	127
5.5.2	Résultats	129
5.5.2.1	Visualisation de l'état de surface	129
5.5.2.2	Répartition de la température.....	130
5.5.2.3	Essais avec des pièces à longueur de couches non constantes.....	131
5.6	Perspectives	135

5.6.1	Modèles complexes et commande sans modèle	135
5.6.2	Application au contrôle pour des pièces en 3 dimensions.....	136
5.7	Conclusion.....	138
Chapitre 6.	...Vers un système contrôle par le comportement physique du produit	141
6.1	Introduction du chapitre 6.....	142
6.2	Modélisation structurelle en impression 3D : Analyse de l'existant	143
6.2.1	Comportement thermomécanique du filament dans la tête d'impression	144
6.2.2	Disposition géométrique du filament après l'extrusion et étude de la liaison inter-couches 146	
6.3	Méthode de Monte-Carlo et usage en thermique couplée.....	150
6.3.1	Fonctionnement de la méthode de Monte-Carlo (MMC)	150
6.3.2	Monte-Carlo pour la résolution de problèmes de thermique couplée	153
6.3.2.1	Modélisation des Transferts Thermiques Couplés	153
6.3.2.2	Algorithme Intégré de Monte-Carlo	154
6.3.3	Principe de la méthode de Monte-Carlo Symbolique (MCS).....	155
6.3.4	Avantage de la méthode de Monte-Carlo Symbolique pour une application en temps réel 155	
6.4	Suivi en temps réel des phénomènes thermiques par MCS : application à l'impression 3D 157	
6.4.1	Mise en Place du Modèle Thermique.....	157
6.4.2	Simulation avec Monte-Carlo Symbolique	158
6.4.3	Perspectives - Application en temps réel pendant l'impression d'une pièce	161
6.5	Conclusion.....	162
Conclusion générale		165
Bibliographie	169	
Annexe 1 : Acquisition de mesures		185
Modèle pour l'acquisition de données - SDK.....		185

Acquisition de données de la caméra et de l'imprimante	187
Analyse des données.....	189
Annexe 2 : Identification des modèles expérimentaux.....	191
Annexe 3 : Optimisation de la commande du système.....	195
Annexe 4 : Contrôle de l'imprimante par le produit	197
Annexe 5 : Contribution : revue de littérature sur les Jumeaux Numériques	199

Table des illustrations

<i>Figure 1 : Organisation d'un Jumeau Numérique comme orchestrateur d'une ingénierie collaborative centrée sur le produit</i>	19
<i>Figure 2 : Représentation de la démarche de conception et de fabrication de produit en mode Do-It-Together, d'après (Marche et al., 2023)</i>	20
<i>Figure 3 : Représentation d'un Jumeau Numérique appliqué au SCP en temps réel</i>	21
<i>Figure 4 : Boucle de contrôle en temps réel de la température du produit imprimé</i>	23
<i>Figure 5 : caricature de l'ingénierie "over-the-wall" (Chang, Wysk and Wang, 1998)</i>	26
<i>Figure 6 : représentation du processus de co-crétion et d'open-manufacturing tel qu'imaginé au sein du projet INEDIT (Kasmi et al., 2021; Marche et al., 2023)</i>	32
<i>Figure 7 : Arbre de décision des sous-catégories de jumeaux numériques</i>	47
<i>Figure 8 : Nombre d'articles sur le Jumeau Numérique dans chaque phase du cycle de vie par année de publication</i>	49
<i>Figure 9 : Proportion de chaque sous-catégorie de Jumeau Numérique, tout au long du cycle de vie du produit</i>	49
<i>Figure 10 : Digital collaborative design process of complex products (Wu et al., 2022)</i>	53
<i>Figure 11 : Vue d'ensemble de la collaboration autour des jumeaux numériques, par (Reim, Andersson and Eckerwall, 2023)</i>	54
<i>Figure 12 : Représentation schématique d'un système Auto ID, d'après (McFarlane et al., 2003)</i>	63
<i>Figure 13 : Contrôle classique d'un processus de production, d'après (McFarlane et al., 2013)</i>	70
<i>Figure 14 : Application du Jumeau Numérique du produit au paradigme du système contrôlé par le produit, pour le contrôle d'un système de production, d'après (McFarlane et al., 2013)</i>	71
<i>Figure 15 : Modèle de conception en oignon d'un Jumeau Numérique pour le paradigme du SCP</i>	77
<i>Figure 16 : Application d'un Jumeau Numérique au paradigme du système contrôlé par le produit en temps réel sur un processus de fabrication additive</i>	81
<i>Figure 17 : distribution de la température d'un point sur différentes couches (ici la couche 1, 11, etc...) après déposition en fonction du temps, d'après (Basgul, Thieringer and Kurtz, 2021)</i>	88
<i>Figure 18 : schéma d'implémentation d'une caméra pour l'observation de la température du filament en sortie de l'extrudeur</i>	99
<i>Figure 19 : Imprimante ALTO</i>	100
<i>Figure 20 : Capture d'écran du logiciel PIX Connect pendant l'impression d'une éprouvette de traction sur l'imprimante Alto</i>	101
<i>Figure 21 : Observation de la température du filament par la caméra thermique via le logiciel Optris</i>	102
<i>Figure 22 : Aperçu dans un slicer du fichier .STL du « wall » utilisé pour nos expérimentations</i>	103
<i>Figure 23 : Mesure de la température du filament en fonction du temps, avec mesures parasites</i>	104
<i>Figure 24 : Mesure de la température du filament en fonction du temps, sans mesures parasites</i>	105
<i>Figure 25 : Application d'un Jumeau Numérique au paradigme du système contrôlé par le produit en temps réel sur un processus de fabrication additive</i>	110

Figure 26 : Observation de la température du filament par la caméra thermique via le logiciel Optris	113
Figure 27 : représentation de l'influence des paramètres de fabrication sélectionnés sur la température du filament extrudé	114
Figure 28 : Evolution de la vitesse du ventilateur (en bleu), de la température de commande de la buse (en rouge) et de la température réelle de la buse (en jaune) en fonction du temps	116
Figure 29 : Evolution de la température de commande de la buse (en bleu) et de la température réelle de la buse (en rouge) en fonction du temps	116
Figure 30 : Représentation de la modélisation du comportement thermique de la buse par un système du 1 ^{er} ordre	117
Figure 31 : Représentation du modèle de comportement de la buse (en bleu) et du système réel (en noir)	118
Figure 32 : Evolution de la vitesse du ventilateur (en bleu), de la température réelle de la buse (en rouge) et de la température du filament (en jaune) en fonction du temps	119
Figure 33 : Modèle du comportement thermique de la buse	119
Figure 34 : Représentation de notre modèle de la température du filament (en rouge) et du système réel (en bleu)	120
Figure 35 : Modèle du comportement thermique de l'imprimante 3D	120
Figure 36 : Représentation du modèle de comportement de l'imprimante (en rouge) et du système réel (en bleu)	121
Figure 37 : Implémentation d'un PID pour la commande de la buse	124
Figure 38 : Implémentation d'un PID pour la commande du ventilateur	124
Figure 39 : Représentation d'un contrôle uniquement par une commande du ventilateur, pour une consigne de température trop élevée	125
Figure 40 : Evolution de la commande de température de la buse (en bleu) et de la vitesse du ventilateur (en orange) en fonction de la différence de température du filament par rapport à la commande (en noir)	126
Figure 41 : Représentation de la boucle de contrôle en temps réel de l'imprimante 3D par le produit	128
Figure 42 : Représentation de l'asservissement en temps réel de l'imprimante 3D par le produit	128
Figure 43 : Photographie d'un « wall » pour lequel la partie basse a été imprimée sans contrôle, et la partie haute avec contrôle par le produit	129
Figure 44 : Représentation en boîtes à moustache des variations de température lors de l'impression d'un « wall », avec et sans contrôle par le produit	131
Figure 45 : Aperçu dans un slicer du fichier .STL du « wall » trapézoïdal utilisé pour nos expérimentations	132
Figure 46 : Mesure de la température du filament en fonction du temps pour un "wall" trapézoïdal, sans contrôle	132
Figure 47 : Mesure de la température du filament en fonction du temps pour un "wall" trapézoïdal, avec contrôle	133
Figure 48 : Représentation en boîtes à moustache des variations de température lors de l'impression d'un « wall » trapézoïdal, avec et sans contrôle par le produit	133
Figure 49 : Représentation d'une commande sans modèle de l'imprimante 3D par le produit	136

<i>Figure 50 : Notre démarche de conception d'un Jumeau Numérique pour le paradigme du SCP, adaptée à une commande sans modèle</i>	136
<i>Figure 51 : Deux éprouvettes de traction imprimées à gauche sans contrôle, à droite avec contrôle</i>	138
<i>Figure 52 : représentation de la tête d'impression en trois parties pour la modélisation (Turner, Strong and Gold, 2014)</i>	145
<i>Figure 53 : Formation des liaisons inter-couches par frittage : (1) contact entre surfaces ; (2) formation du col de frittage ; (3) formation du col de frittage et diffusion moléculaire à l'interface, d'après (Garzon-Hernandez et al., 2020)</i>	147
<i>Figure 54 : Positionnement de 13 points sonde sur le « wall »</i>	158
<i>Figure 55 : définition des sources pour l'application de la MCS</i>	159

Introduction générale et démarche de réflexion

Ce travail de thèse porte sur l'utilisation du Jumeau Numérique comme outil pour une application en temps-réel du paradigme du « système contrôlé par le produit » (SCP) à la conception et la fabrication collaborative d'un produit par impression 3D.

Par extension du SCP, il s'agit d'utiliser cette technologie comme le moyen d'observabilité directe de l'état physique d'un produit pour contrôler son procédé de fabrication additive afin d'ancrer son ingénierie collaborative de conception sur cette réalité physique. En ce sens, ces travaux de doctorat sont une contribution à l'ingénierie collaborative de conception et de fabrication d'un nouveau produit telles que défendues par le concept de Do-It-Together (Dupont *et al.*, 2021).

L'originalité de ces travaux est de proposer à l'ingénierie collaborative d'établir une connectivité entre le produit et des informations en temps réel de lui-même, lui conférant ainsi un rôle d'orchestrateur de sa propre fabrication, pour faire face à des situations inattendues trop souvent subordonnées aux contraintes de conception pour la fabrication additive.

Les expérimentations que nous avons menées ont eu comme objectif de prouver la faisabilité de cette fabrication additive contrôlée par le produit pour satisfaire des exigences de résistance mécanique influencées par des phénomènes thermiques, rendus visibles par l'observabilité directe de la température du filament extrudé constituant le produit.

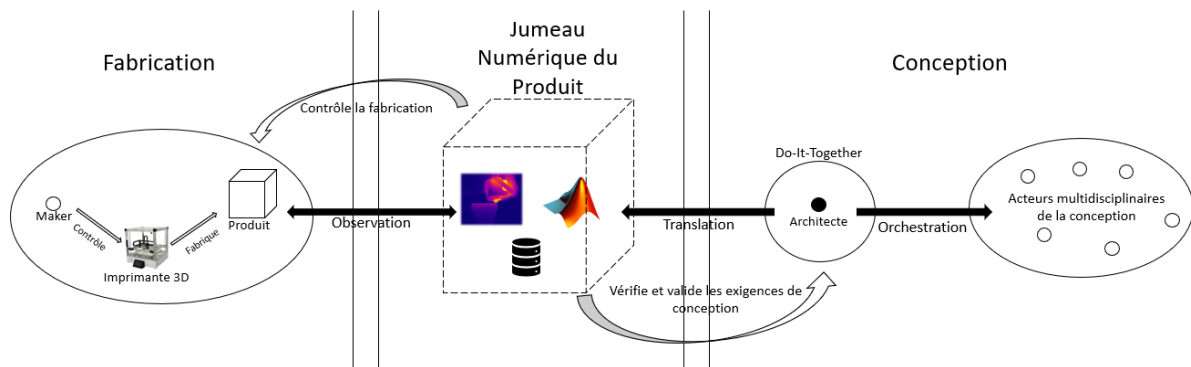


Figure 1 : Organisation d'un Jumeau Numérique comme orchestrateur d'une ingénierie collaborative centrée sur le produit

Ces travaux de thèse se sont déroulés dans le cadre du projet européen INEDIT² (open INnovation Ecosystems for Do It Together process), auquel le laboratoire ERPI a participé dans le cadre du programme H2020³. Ce projet avait pour objectif de faire converger, dans le secteur de l'ameublement, l'approche « Do-It-Yourself » (DIY), caractéristique du mouvement des FabLabs et de l'esprit maker, la socio-fabrication et les principes de l'économie circulaire, vers une approche « Do-It-Together » (DIT) (Marche *et al.*, 2023). Cette approche « Do-It-Together » se définit comme un processus collaboratif de conception et de fabrication social et décentralisé (Hirscher, Niinimäki and Joyner Armstrong, 2018), impliquant le consommateur, les entreprises, ainsi que d'autres parties prenantes spécialisées.

En ce sens, l'emploi de technologies facilitatrices des pratiques collaboratives, comme le prototypage rapide (impression 3D) en phase de conception qui permet une interaction entre les différentes parties prenantes, ou les technologies immersives en phase de conception et d'usage, avait pour objectif de permettre à ces différents acteurs de partager une vision tangible du produit en phase de conception et de fabrication.

Au sein du projet INEDIT, une des contributions du laboratoire ERPI a été de faire de ce processus collaboratif une filière de valeurs co-crées et distribuées, en conceptualisant un processus de conception en co-création, basé sur une interaction de tous les acteurs du produit (utilisateurs, concepteurs, makers) avec le produit circulant, présentée à la Figure 2.

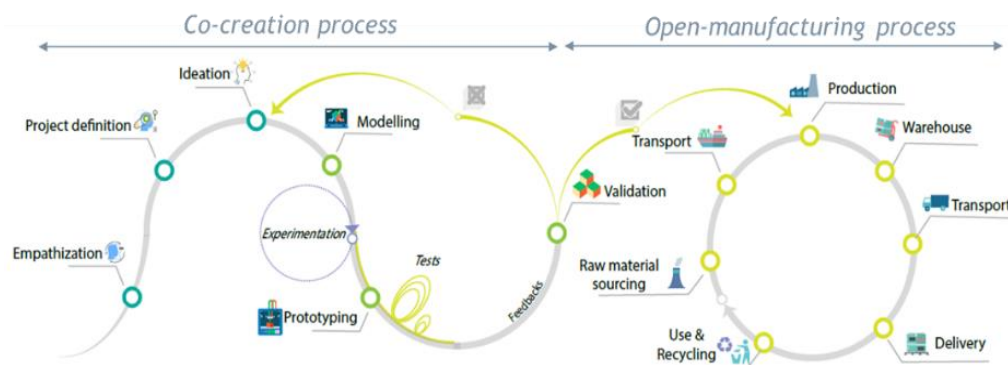


Figure 2 : Représentation de la démarche de conception et de fabrication de produit en mode Do-It-Together, d'après (Marche *et al.*, 2023)

² Un projet porté de 2020 à 2023 par un consortium de 14 partenaires, comprenant des universités, des PME, et des grandes entreprises. DOI : [10.3030/869952](https://doi.org/10.3030/869952) - Grant agreement ID: 869952.

³ Ce programme vise à relever les défis de l'Usine du Futur en repensant les méthodes de consommation et de production.

Nos travaux de thèse s’inscrivent dans la continuité du projet INEDIT afin de renforcer le lien entre conception et fabrication d’un produit pour mieux fonder l’aspect collaboratif d’une approche Do-It-Together. Par analogie avec le SCP, nous postulons que la tangibilité du produit doit être la source de ce lien afin de permettre, dans une perspective d’ingénierie collaborative, une vérification et une validation « au fil de l’eau » par les différents acteurs pluridisciplinaires requérant le produit pour satisfaire leurs besoins.

Notre hypothèse de travail est relative à l’ancrage par l’état physique du produit de la situation de conception avec la situation de fabrication pour bien mettre en évidence le « chaînon » de congruence nécessaire pour établir une cohérence entre le processus d’ingénierie et son résultat tangible (Mayer, 2023).

Notre réponse de recherche a pour objectif de mieux percevoir cette réalité tangible du produit pour mieux agir en conception et en fabrication. C’est dans ce sens que nous proposons le Jumeau Numérique comme une technologie d’observabilité directe d’un produit en fabrication pour ancrer sa conception sur la réalité physique. Nous proposons ainsi de se servir du Jumeau Numérique du produit se fabriquant comme outil pour implémenter le SCP en temps réel, afin que le produit commande sa fabrication, comme représenté à la Figure 3.

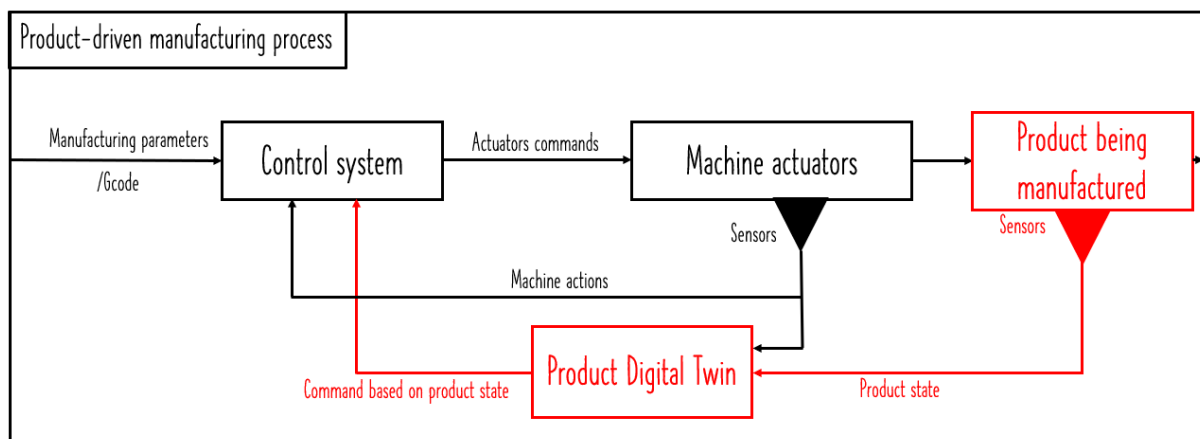


Figure 3 : Représentation d’un Jumeau Numérique appliqué au SCP en temps réel

Le choix d’un procédé de fabrication additive par dépôt de filament fondu (FFF) se justifie par la continuité de son utilisation en phase de conception et de fabrication, prédéfinissant un lien informel entre prototypage rapide d’un produit et réalisation tangible de celui-ci.

De plus, le couplage fort entre la mécanique et la thermique au sein de ce processus de fabrication en fait un candidat idéal pour un contrôle plus poussé de ces phénomènes multiphysiques, en comparaison de procédés de mise en forme soustractifs classiques.

Les 6 chapitres de ce mémoire ont pour objectif d'explorer l'usage du Jumeau Numérique comme une technologie pour une application en temps-réel du paradigme du SCP, en explorant divers aspects de l'ingénierie collaborative et de la conception de produits.

Le **premier chapitre** introduit le concept d'ingénierie collaborative dans le processus de conception de produits, soulignant l'importance de la coopération entre différents acteurs. Ce chapitre met en évidence l'efficacité du Do-It-Together (DIT) dans un environnement local, tout en identifiant les défis pour son intégration dans un écosystème plus large. L'accent est mis sur la nécessité de suivre et de rendre tangible le produit tout au long de sa fabrication, posant ainsi les bases pour l'utilisation du Jumeau Numérique.

Le **deuxième chapitre** se concentre sur le Jumeau Numérique comme un outil innovant facilitant l'ingénierie collaborative. Il permet la simulation et la validation virtuelle des produits, mais également l'observation et l'interaction en temps réel avec le produit en cours de fabrication. Les limites actuelles de cette technologie sont discutées, notamment l'observation directe des données du produit sans modélisation avancée de son comportement physique.

Le **troisième chapitre** examine les approches d'observabilité du flux circulant de produits et propose une méthodologie pour permettre une observabilité directe et un contrôle en temps réel du procédé de fabrication par le produit lui-même. Ce chapitre introduit les concepts d'intelligence du produit et de produits intelligents, et souligne l'importance de l'observabilité pour la gestion efficace des flux de production.

La suite du manuscrit applique cette méthodologie au contexte de la fabrication additive, en se concentrant sur les phénomènes thermiques impliqués dans l'impression 3D.

Le **quatrième chapitre** détaille l'application de cette méthodologie pour permettre l'observabilité en temps réel d'un produit fabriqué, appliqué à un procédé de fabrication additive. Cela implique de recueillir des données en temps réel du produit et d'utiliser ces données pour optimiser le processus de fabrication.

Dans le cadre de cette application, nous ne cherchons comme preuve de concept qu'à représenter qu'une information : la température du produit au cours de la fabrication, et notamment la température du produit au moment de son extrusion, c'est-à-dire à la sortie de la buse. Pour cela, nous avons conçu et mis en application une démarche expérimentale originale, consistant en l'installation

d'une caméra thermique au niveau de l'imprimante 3D, permettant de mesurer la température en sortie de la buse. Cela permet donc de récupérer de manière directe des données issues du produit. Cette caméra est reliée à un ordinateur sur lequel un algorithme analyse les données issues de la caméra, et identifie la position de l'extrudeur et la température en sortie de celui-ci. Cette démarche expérimentale a permis de valider la traçabilité de la température du filament en temps réel en vue d'intégrer cette information dans une boucle de contrôle permettant d'opérationnaliser le Jumeau Numérique.

Le **cinquième chapitre** élargit cette application pour créer un système complexe contrôlé par le produit lui-même. En intégrant un dispositif de contrôle en temps réel par le produit, nous démontrons comment les données en temps réel peuvent être utilisées pour ajuster les paramètres de fabrication et garantir la conformité aux exigences de conception. Nous avons conçu et implémenté la boucle de contrôle en temps réel pour opérationnaliser le Jumeau Numérique du produit se fabriquant, présenté à la Figure 4, permettant une observation directe du produit, et à partir de cette observation directe, d'effectuer le contrôle du processus de fabrication pour conformer le produit en train de se fabriquer avec celui défini au terme de la phase de conception. Ainsi, le produit guide la machine en fonction des exigences de conception, créant ainsi un flux continu d'informations entre la situation de conception et la situation de fabrication.

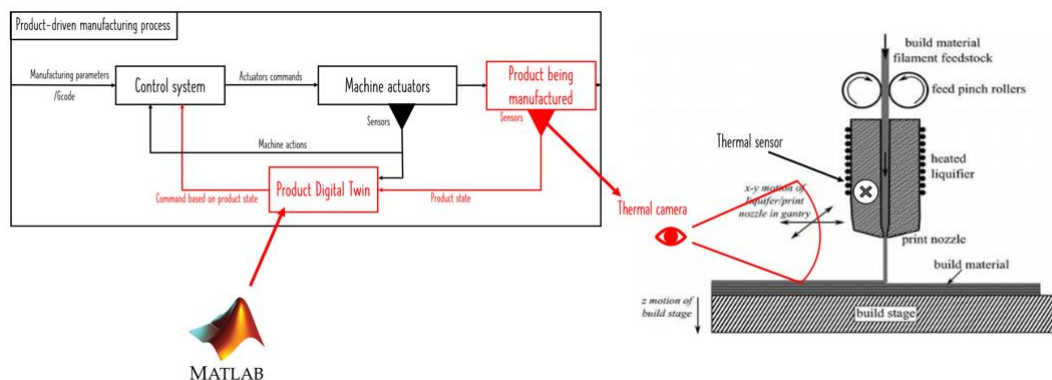


Figure 4 : Boucle de contrôle en temps réel de la température du produit imprimé

Une limite de cette application pour l'observabilité du produit se situe autour de la notion de ce que l'on observe du produit. En effet, dans cette expérimentation, on observe uniquement une donnée « brute » du produit, à partir de laquelle on peut effectuer une boucle de contrôle au niveau du process de fabrication (l'imprimante 3D), mais on n'observe pas le comportement physique du produit en train de se fabriquer à travers cette seule donnée brute « telle quelle ».

Pour s'affranchir de cette limitation, nous décidons d'implémenter dans notre Jumeau Numérique un modèle physique du comportement thermique du produit se fabriquant, afin d'observer l'état

physique du produit au cours de la fabrication, et d'effectuer le contrôle du processus de fabrication pour conformer l'état physique du produit en train de se fabriquer avec ces propriétés physiques finales définies au terme de la phase de conception.

Nous étudions également comment s'affranchir du modèle de l'outil de fabrication interagissant avec l'outil, à travers l'emploi de la Commande Sans Modèle (CSM), afin de permettre une généralisation de notre application de contrôle par le produit pour n'importe quelle imprimante FFF.

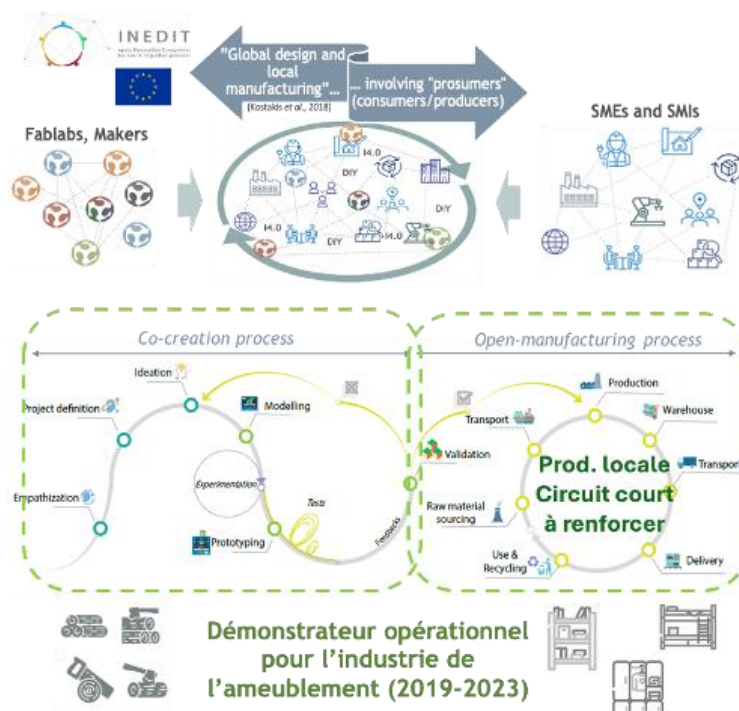
Dans ce cadre, le **sixième chapitre** explore une perspective de modélisation pour permettre un contrôle basé sur les exigences de conception du produit, en utilisant des méthodes de modélisation de Monte-Carlo. Cela permet d'améliorer l'observabilité du produit et de simplifier les calculs complexes associés aux processus d'impression 3D.

À travers ces chapitres, ce travail de thèse présente une vue d'ensemble complète et progressive des défis et des innovations dans le domaine de l'ingénierie collaborative et de la conception de produits. Il offre des perspectives pour une fabrication contrôlée en temps réel par les états du produit, posant ainsi les bases pour le développement futur de ce champ de recherche.

CHAPITRE 1.

INGENIERIE COLLABORATIVE POUR LA CONCEPTION D'UN PRODUIT

Représentation du fonctionnement du Do-It-Together dans le cadre du projet Européen INEDIT, d'après (Dupont, 2024)



1.1 Introduction du chapitre 1

La conception de produits a traversé divers paradigmes, évoluant d'approches traditionnelles et concurrentes vers des méthodologies plus collaboratives. L'ingénierie traditionnelle, caractérisée par une approche séquentielle et linéaire, a longtemps été le modèle dominant pour la conception et le développement de produits. Cette méthode repose sur un processus rigide, souvent symbolisé par le modèle en cascade, où chaque phase du projet doit être achevée avant que la suivante puisse commencer. Ce modèle « over-the-wall » est présenté Figure 5. Cependant, ses limites incluent un manque de flexibilité face aux changements imprévus et une difficulté à intégrer de nouvelles informations en cours de route.



Figure 5 : caricature de l'ingénierie "over-the-wall" (Chang, Wysk and Wang, 1998)

Ces limites inhérentes aux pratiques conventionnelles, où des silos disciplinaires entravent souvent l'innovation et la créativité, ont conduit à l'émergence de nouvelles approches telles que l'ingénierie concurrente, qui permet un chevauchement des phases de développement, favorisant la coopération simultanée et accélérant le processus de conception, puis de l'ingénierie collaborative, qui mise sur une coordination efficace et un partage d'informations transparent entre les parties prenantes (Maranzana, Gartiser and Caillaud, 2008), améliorant la prise de décision et l'efficacité globale (Putnik *et al.*, 2021; Varela, Putnik and Romero, 2022).

Le chapitre explore cette évolution, présentant l'ingénierie collaborative comme une méthodologie novatrice pour la conception de produits, notamment à travers l'approche "Do-It-Together" (DIT) dans le contexte du projet européen INEDIT.

1.2 Contextualisation du sujet de thèse

Cette partie introductive a pour objectif d'établir le contexte général du projet INEDIT et de définir les approches DIY et DIT telles qu'elles ont été abordées et développées dans le cadre de ce projet.

1.2.1 Présentation du projet européen INEDIT

Le projet européen INEDIT, acronyme de « *open INnovation Ecosystems for Do It Together process* », a été lancé dans le cadre du programme H2020 de l'Union européenne. Il s'agit d'une initiative qui vise à explorer et à promouvoir des modèles d'innovation collaboratifs dans le secteur de la fabrication. L'objectif principal du projet INEDIT est de faire converger les approches « Do-It-Yourself » (DIY) et « Do-It-Together » (DIT) afin de stimuler l'innovation et la co-création dans les écosystèmes de fabrication. Cette convergence a pour but de favoriser l'engagement et la participation active des consommateurs et des autres parties prenantes dans le processus de conception et de fabrication.

Le projet réunit un consortium diversifié de partenaires provenant de différents pays européens, dont des laboratoires de recherche, des universités, et des entreprises du secteur privé. Leur collaboration permet de mettre en œuvre une démarche pluridisciplinaire et intersectorielle pour explorer et expérimenter de nouvelles approches dans le domaine de la fabrication.

Dans le cadre du projet INEDIT, un accent particulier a été mis sur l'application des concepts DIY et DIT au secteur de l'ameublement, en particulier dans la conception et la fabrication de meubles en bois. Le projet vise à démontrer comment ces approches peuvent transformer la structure et le fonctionnement des processus traditionnels de conception et de production, en impliquant activement les consommateurs et les autres parties prenantes tout au long de la chaîne de valeur à une échelle locale.

Le projet INEDIT s'articule autour de plusieurs axes de travail, tels que la mise en place de plateformes d'innovation ouverte, l'expérimentation de nouveaux modèles d'affaires collaboratifs, et l'application de technologies numériques avancées pour faciliter la co-création et la personnalisation des produits. Grâce à ces initiatives, INEDIT aspire à générer de nouvelles connaissances et des pratiques innovantes qui peuvent être adaptées à d'autres secteurs de l'industrie.

1.2.2 Contexte de l'étude : convergence des approches DIY et DIT

Le projet INEDIT cherche à établir une convergence entre deux approches distinctes mais complémentaires : « Do-It-Yourself » (DIY) et « Do-It-Together » (DIT). Ces deux approches ont chacune leurs spécificités, mais leur combinaison ouvre la voie à de nouvelles opportunités de collaboration et d'innovation dans le secteur de la fabrication.

L'approche « Do It Yourself » (DIY)

L'approche DIY est caractérisée par l'esprit d'autonomie et de créativité qui anime les individus souhaitant prendre en main la conception et la fabrication de produits (Paper and Prendeville, 2017; Hirscher, Niinimäki and Joyner Armstrong, 2018). Cette approche est souvent associée au mouvement des FabLabs et à l'esprit « maker ». L'approche DIY encourage les individus à expérimenter et à innover, ce qui favorise la personnalisation des produits et le partage des connaissances au sein des communautés de fabrication.

Le principe du DIY a connu une évolution significative au fil des décennies. Initialement, il était principalement orienté vers des activités personnelles où les individus réalisaient des projets pour leur propre usage. Au fil du temps, le DIY a évolué vers une phase d'industrialisation, permettant aux individus de créer des produits pour la vente ou l'échange. Actuellement, nous sommes dans une ère où le DIY s'intègre profondément dans les domaines de l'innovation, de la technologie et de l'entrepreneuriat, souvent par le biais de collaborations avec des laboratoires traditionnels, des gouvernements et des organismes de réglementation (Sarpong *et al.*, 2020; Damoah and Botchie, 2021).

En termes d'interactions sociales, le DIY favorise la collaboration et le partage de connaissances. Les hackspaces, fablabs et autres espaces communautaires deviennent des lieux où les individus peuvent se réunir pour travailler sur des projets communs, échanger des idées et s'entraider. Cela transforme les relations traditionnelles de travail et de production, encourageant une culture de la coopération plutôt que de la compétition. Les réseaux sociaux et les plateformes de partage en ligne renforcent ces interactions en permettant aux personnes de différents horizons et régions de se connecter, de collaborer et de diffuser leurs idées (Gauntlett, 2011). Cette diffusion rapide est propulsée par la facilité d'accès à l'information, les technologies abordables et la montée des communautés en ligne qui partagent des connaissances et des ressources. Les différents acteurs peuvent apprendre de manière autodidacte, utilisant des ressources en ligne, des tutoriels vidéo, et des forums de discussion. Cela crée une culture de l'apprentissage continu et informel, où les compétences pratiques sont souvent valorisées autant que les connaissances théoriques. Cette méthode d'apprentissage

participative et autodirigée permet une plus grande autonomie et flexibilité dans le développement des compétences (Hakken, 1996).

L'appropriation des nouvelles technologies est également transformée par le DIY. Au lieu d'être de simples consommateurs de technologies, les individus deviennent des créateurs et des innovateurs (Fox, 2014). Ils bricolent, modifient et améliorent les technologies existantes pour répondre à leurs besoins spécifiques. Cette approche participative de la technologie favorise l'innovation ascendante, où les solutions émergent de la base plutôt que d'être imposées par les grandes entreprises ou les institutions. Cela démocratise l'innovation et permet une personnalisation accrue des produits et des services. Le DIY change également la manière de concevoir et de mettre en place des solutions de manière collective. Les projets DIY reposent souvent sur une approche itérative et collaborative, où les idées sont constamment testées et améliorées par la communauté. Cela contraste avec les méthodes de développement de produits traditionnelles, plus linéaires et centralisées. En encourageant une participation active et collective, le DIY permet de créer des solutions plus adaptées aux besoins réels des utilisateurs et favorise l'engagement communautaire (Atkinson, 2006).

Du DIY vers une approche Do-It-Together (DIT)

L'approche DIT est définie comme un processus social et décentralisé de conception et de fabrication (Hirscher, Niinimäki and Joyner Armstrong, 2018; Külschbach, Leiting and Stich, 2020; Dupont *et al.*, 2021). Elle repose sur une collaboration interculturelle et inter-métiers entre différents acteurs, notamment les consommateurs, les entreprises, et d'autres parties prenantes spécialisées. Le processus DIT permet d'exploiter les compétences et les ressources de chaque acteur pour créer des produits mieux adaptés aux besoins des utilisateurs finaux. L'approche DIT peut ainsi se décrire comme une version élargie et enrichie du DIY, qui met également l'accent sur la co-crédation et la collaboration tout au long de la chaîne de valeur, de la conception à la fabrication.

La convergence des approches DIY et DIT offre un potentiel considérable pour stimuler l'innovation et l'efficacité dans les processus de fabrication. En combinant l'autonomie et la créativité du DIY avec la collaboration et la co-crédation du DIT, il est possible de créer des produits plus personnalisés et adaptés aux besoins spécifiques des utilisateurs (Marche *et al.*, 2023). Cette convergence peut également favoriser l'adoption de principes de l'économie circulaire, en encourageant la réutilisation, le recyclage et la réduction des déchets dans les processus de conception et de fabrication. En intégrant ces approches, les écosystèmes de fabrication peuvent devenir plus flexibles, réactifs et adaptés aux évolutions des marchés et des attentes des consommateurs.

Contributions de recherche au développement des pratiques Do-It-Together

Le DIT s'appuie sur le développement de plateformes d'innovation ouverte enrichi de l'innovation par l'usage, associant les usagers pour soutenir la collaboration entre les différentes parties prenantes (Dupont *et al.*, 2014, 2017; Osorio *et al.*, 2019; Kasmi *et al.*, 2022; Pruvot, Dupont and Morel, 2022). Ces plateformes permettent le partage d'idées, de compétences et de ressources entre les acteurs, et favorisent la co-crédation de produits personnalisés. Des contributions ont également été apportées à l'intégration de technologies numériques dans ces plateformes pour faciliter les interactions et la communication entre les acteurs (Gabriel *et al.*, 2016; Dupont *et al.*, 2017).

Dans ce contexte, le laboratoire ERPI a joué un rôle clé dans le projet européen INEDIT en apportant son expertise en matière d'innovation et de co-crédation dans les processus de fabrication. Les compétences du laboratoire ont été mises à contribution sur plusieurs axes de recherche⁴. Un axe de recherche a été mené sur la transformation du processus collaboratif entre les parties prenantes en une filière de valeurs co-crédées (Marche *et al.*, 2017, 2019). Cette filière de valeurs repose sur l'implication active des consommateurs, des entreprises et d'autres acteurs spécialisés, appuyé d'outils immersifs collaboratifs tout au long du processus de conception et de fabrication. Des travaux ont également étudié comment le produit peut jouer un rôle central dans l'orchestration du processus collaboratif (Castro Espíritu, Mayer and Lhoste, 2008). Cette orchestration par le produit consiste à concevoir des objets qui facilitent et stimulent la collaboration entre les différents acteurs. Par exemple, les produits peuvent être conçus de manière à encourager les utilisateurs à apporter leurs propres modifications ou personnalisations, favorisant ainsi une approche plus participative.

Ce travail de thèse est un prolongement de cet axe d'étude du projet INEDIT et plus généralement des travaux du laboratoire sur cette thématique.

Ce qu'il faut retenir du contexte

- Le projet européen INEDIT vise à explorer et promouvoir l'innovation collaborative dans le secteur de la fabrication, en repensant l'approches DIY et en enrichissant le DIT. Ces approches permettent de stimuler l'innovation et la co-crédation dans les écosystèmes de fabrication, ici appliqués au secteur de l'ameublement. Le projet met l'accent sur

⁴ <https://www.inedit-project.eu>

l'application de plateformes d'innovation ouverte intégrant les usagers, l'expérimentation de modèles collaboratifs et l'utilisation de technologies numériques.

- Ce travail de thèse participe à l'une des contributions du laboratoire sur ce sujet, à savoir étudier comment les produits peuvent orchestrer la collaboration entre les acteurs en participant au développement de plateformes d'innovation ouverte.

1.3 L'approche « Do-It-Together » : Concept et applications

Après avoir situé le contexte de ce travail de thèse, cette partie vise à définir de manière détaillée le fonctionnement du DIT, tel qu'il a été étudié dans le programme INEDIT.

1.3.1 Le Do-It-Together

L'approche « Do-It-Together » (DIT) (Hirscher, Niinimäki and Joyner Armstrong, 2018) se définit comme un processus de conception et de fabrication social et décentralisé qui met l'accent sur la collaboration entre les différents acteurs impliqués dans le cycle de vie d'un produit, de la conception à la fabrication, voire à la distribution et à l'utilisation finale. Contrairement à l'approche « Do-It-Yourself » (DIY) qui met l'accent sur la création individuelle, la DIT encourage les efforts collectifs, englobant les contributions de consommateurs, d'entreprises, d'artisans, de designers, et d'autres parties prenantes spécialisées (Dupont, Kasmi, *et al.*, 2023). Au sein d'INEDIT, l'objectif est ainsi de s'inspirer du DIY et de l'esprit des fablabs pour augmenter les capacités des PME en conception et en fabrication et les aligner avec la stratégie « Factories of the Future »⁵ de l'Union Européenne (Dupont, Kasmi, *et al.*, 2023).

Le principe du DIT en ingénierie collaborative englobe plusieurs aspects clés (Pallot *et al.*, 2023). Premièrement, il favorise le partage de connaissances et d'informations entre les participants, y compris l'expertise technique, les approches de résolution de problèmes et les leçons tirées des expériences précédentes. Cette connaissance collective permet au groupe de relever des défis complexes en tirant parti de l'intelligence collective.

⁵ Voir <https://www.effa.eu/factories-future/>

Les processus DIT encouragent une approche ouverte et inclusive de la collaboration, mettant l'accent sur la transparence et l'échange d'idées, de commentaires et de suggestions. Cela peut être facilité par le biais d'ateliers, de plates-formes en ligne ou de réunions physiques où les individus se réunissent pour contribuer au processus d'ingénierie.

De plus, le DIT reconnaît la valeur des ensembles de compétences diversifiés et encourage les participants ayant des antécédents, une expertise et des perspectives différents à contribuer. En rassemblant des individus aux compétences complémentaires, un éventail plus large de solutions peut être exploré, conduisant à des approches innovantes.

Le DIT appelle un processus itératif et incrémentiel, où les participants construisent ou suggèrent des évolutions à partir des contributions des uns et des autres. Le projet évolue à travers de multiples cycles de conception, de mise en œuvre, de test et de raffinement, représentés sur la Figure 6. Les boucles de rétroaction et la communication régulière jouent un rôle important dans ce processus.



Figure 6 : représentation du processus de co-création et d'open-manufacturing tel qu'imaginé au sein du projet INEDIT (Kasmi et al., 2021; Marche et al., 2023)

1.3.2 Implications des différentes parties prenantes dans le processus DIT

Le processus Do-It-Together (DIT) est caractérisé par la participation active et la collaboration de divers acteurs impliqués dans la conception et la fabrication de produits. Cette collaboration interdisciplinaire et interculturelle est cruciale pour le succès de l'approche DIT.

Les consommateurs, ou utilisateurs finaux, jouent un rôle central dans l'approche Do-It-Together (DIT). Contrairement aux processus de conception et de fabrication traditionnels, où les consommateurs sont souvent des destinataires passifs de produits finis, l'approche DIT les intègre activement à chaque étape du processus. Ainsi, ils sont encouragés à s'impliquer dès les premières étapes de la conception. Ils peuvent exprimer leurs besoins, préférences et attentes, et ainsi influencer les caractéristiques des produits en cours de développement. Cette implication directe des consommateurs dans le processus

de conception permet de créer des produits personnalisés, adaptés à leurs goûts et exigences spécifiques. Cette personnalisation peut se manifester dans le choix des matériaux, des couleurs, des formes ou des fonctionnalités.

Ainsi, durant toute la phase amont du projet, à savoir la phase de co-conception, les consommateurs travaillent en collaboration avec d'autres parties prenantes telles que les designers, les ingénieurs ou les fabricants. Ils fournissent un retour d'expérience pendant cette phase qui permet d'améliorer les prototypes et d'ajuster les produits en fonction de leurs attentes réelles, ce qui mène à une plus grande satisfaction. Ces échanges interdisciplinaires permettent de créer des produits innovants qui intègrent les idées et les attentes des consommateurs.

Le processus DIT informe les consommateurs en leur offrant l'opportunité d'apprendre et de comprendre les différentes étapes de la conception et de la fabrication. Cela les encourage à s'impliquer davantage dans la création de produits qu'ils utiliseront. En effet, les acteurs pluridisciplinaires partagent leurs connaissances et compétences avec les autres parties prenantes. Ces échanges favorisent l'innovation ouverte et la création d'un écosystème collaboratif dynamique et interdisciplinaire.

Mis à part les utilisateurs du produit, qui interviennent en phase amont du processus, d'autres acteurs interviennent tout au long du processus de fabrication. Les concepteurs, artisans et designers jouent un rôle fondamental dans le processus DIT en apportant leurs compétences spécialisées dans divers domaines tels que la CAO et la FAO, l'électronique, le design industriel, la menuiserie, le textile, etc. Leur expertise technique et créative permet d'explorer de nouvelles approches de conception et de fabrication. En collaborant étroitement avec les consommateurs, ces acteurs peuvent mieux comprendre leurs besoins et préférences, et proposer des solutions innovantes pour relever des défis complexes en matière de conception et de fabrication. Leur approche créative peut conduire à des produits uniques et différenciés sur le marché. Par l'emploi de technologies de prototypage comme le maquettage, l'impression 3D ou la découpe laser, ils permettent d'accélérer le processus de conception, tout en réduisant les coûts.

Ces acteurs jouent également un rôle clé dans le développement de l'économie locale en soutenant la production et la consommation locale (Dupont, Kasmi, *et al.*, 2023). Leur implication dans le processus DIT favorise l'essor de petites entreprises et de communautés créatives, contribuant ainsi à la diversité et à la vitalité des économies régionales.

Si l'on se réfère à la Figure 6, on peut observer que le déroulement du processus Do-It-Together, tel que mis en place au sein du projet INEDIT, se décompose en deux phases distinctes. Une première

phase représente le processus de co-création, c'est-à-dire la phase de collaboration où les différentes parties prenantes pluridisciplinaires travaillent ensemble pour créer des produits, services ou solutions innovantes.

En phase de fabrication, le DIT est souvent résumé à une pratique d'open manufacturing. L'open manufacturing (ou fabrication ouverte) désigne un modèle de production où les conceptions et les processus de fabrication sont partagés publiquement pour permettre une collaboration et une amélioration collective. Ce concept s'inspire des principes de l'open source dans le domaine des logiciels, où les informations sont librement accessibles et peuvent être modifiées par n'importe qui. L'open manufacturing est une pratique régulièrement associée aux communautés DIY et DIT, notamment grâce à l'accès libre et ouvert via des plateformes en ligne à des designs, des plans de production, et des guides pratiques de fabrication, ce qui permet à des petites entreprises et des makers individuels de participer à des projets de fabrication sans les contraintes financières des modèles traditionnels.

L'open manufacturing se distingue des méthodes de fabrication traditionnelles sur plusieurs points (Li *et al.*, 2018; Kusiak, 2020):

- Par son côté « open », c'est-à-dire qui permet à n'importe quel acteur de participer au processus de fabrication pour obtenir un produit final identique. Il s'agit donc de favoriser l'« ubiquité » du produit pendant la production.
- Par son approche décentralisée, souvent à l'échelle locale ou régionale, qui favorise l'économie circulaire.
- Par l'utilisation de technologies de fabrication numérique et de prototypage rapide (impression 3D notamment).
- Par l'interaction et la collaboration des différentes parties prenantes tout au long du processus.

Dans ce contexte, on voit que l'ensemble des acteurs est censé participer également au processus de fabrication, comme cela a été le cas durant le processus de conception.

Ce qu'il faut retenir du DIT

- L'approche "Do-It-Together" (DIT) est une méthode collaborative de conception et de fabrication qui encourage la participation active de divers acteurs, tels que les consommateurs, artisans, designers et autres parties prenantes. Contrairement à l'approche DIY centrée sur la création individuelle, le DIT favorise les efforts collectifs pour travailler sur un projet en partageant connaissances, ressources et compétences.
- Les consommateurs jouent un rôle central en influençant les produits dès les premières étapes de la conception. Les makers, artisans et designers apportent leur expertise technique tout au long du projet pour explorer de nouvelles approches de conception et de fabrication.
- Dans le projet INEDIT, le DIT se décompose en deux phases : la co-crétation, qui implique une collaboration pluridisciplinaire, et l'open manufacturing, une fabrication ouverte qui encourage la participation de diverses parties prenantes et l'utilisation de technologies numériques.

1.4 Limites du Do-It-Together pour une pratique interdisciplinaire en conception et en fabrication

L'objectif du projet Européen INEDIT était notamment, par l'application du paradigme du Do-It-Together, de passer d'une démarche de conception et de fabrication pluridisciplinaire (différentes disciplines travaillent de manière indépendante sur un même problème sans nécessairement intégrer leurs perspectives), à une véritable démarche interdisciplinaire (approche collaborative intégrant les méthodes, théories et perspectives de plusieurs disciplines pour obtenir une compréhension holistique d'un problème commun).

Cette application a montré des limites d'une part en conception, et d'autre part en fabrication.

1.4.1 Limites de l'application du Do-It-Together en phase de co-conception

L'une des principales limites du Do-It-Together, visualisée dans le cadre du projet INEDIT, réside dans la disparité d'engagement entre les participants, notamment car ces différents participants peuvent appartenir à des organisations différentes, là où les projets collaboratifs plus classiques se situent au sein d'une organisation unique (Külschbach, Leiting and Stich, 2020). Certains individus peuvent être passionnément investis dans le projet, tandis que d'autres pourraient ne pas partager le même niveau

d'enthousiasme. Ceci peut créer des déséquilibres dans la répartition des tâches et compromettre la qualité globale du travail collaboratif. Les raisons de ces différences d'engagement peuvent être variées, allant des intérêts personnels divergents à des contraintes temporelles ou professionnelles.

Un autre défi majeur du Do-It-Together en co-conception réside dans le changement fréquent des acteurs tout au long du processus de conception. Les projets collaboratifs basés sur le DIT sont des processus multi-acteurs qui peuvent s'étendre sur des périodes prolongées, et il est courant que les membres de l'équipe changent en raison de fluctuations de disponibilité, d'intérêts ou même de besoins organisationnels. Ces changements peuvent entraîner une perte de continuité, de cohérence et de compréhension collective, impactant ainsi la qualité du travail accompli. Ce défi implique le développement et l'usage d'outils de collaboration pour conserver un suivi du produit durant toute la phase de conception. C'est ce que fait notamment le secteur de la construction avec l'usage du BIM (Lee and Lee, 2021). Le projet INEDIT a également exploré l'usage de ces outils (Dupont, Caceres, *et al.*, 2023).

Le DIT dépend fortement de la transmission efficace de la connaissance entre les acteurs. Lorsqu'il y a un changement d'acteur physique (changement de personne au sein d'une entité acteur) ou d'acteur moral (différentes entités à chaque phase de la conception), il existe un risque inhérent de perte de connaissances accumulées au fil du temps (Monticolo *et al.*, 2014). Cette perte peut entraîner une diminution de la cohérence du projet, des retards dans la prise de décision et une nécessité de répéter des étapes précédemment accomplies.

Malgré la mise en place de mécanismes de gestion et de communication (outils de suivi du progrès, sessions de partage d'informations, processus de transfert de connaissances), ces limites ont pu ralentir la mise en application de certaines phases du projet. La distance, à la fois géographique mais aussi dans la forme des entités acteurs (entreprises, start-ups, universités, ...), a aussi pu être un frein à l'échange et l'interaction des acteurs lors de ce projet. Le COVID a été un obstacle supplémentaire important pour le développement du projet INEDIT, il a largement réduit la capacité des partenaires de se voir et travailler physiquement au même endroit, ce qui a complexifié les échanges pour un ensemble d'acteurs pluriels répartis dans plusieurs pays et pratiquant des langages différents.

1.4.2 Limites de l'application du Do-It-Together en phase de fabrication

Au sein de cette application du Do-It-Together (DIT) dans le contexte du projet INEDIT, l'usage de l'open-manufacturing soulève des défis significatifs liés à la nature même du processus de fabrication. Contrairement à la phase de conception, où la collaboration est souvent encouragée, la fabrication en

open-manufacturing n'a pas toujours été intégrée de manière systématique comme une partie inhérente nécessitant la coopération de divers acteurs du projet.

On peut voir sur la représentation du processus de co-crédation et de fabrication prdsentée sur la Figure 6 que la partie fabrication est sdrparée de la partie co-crédation, et que les diffdrrentes boucles d'itdration que l'on voyait apparaître durant le processus de co-crédation, qui permettaient aux diffdrrentes parties prenantes de se concerter sur l'État du projet et du produit final, ne sont pas prdsentes en fabrication.

En rralit, le processus de fabrication drcrit dans le projet INEDIT n'applique que deux des quatre points citds prcdemment pour le processus de fabrication ouverte : l'approche dcdentralisde et de proximit, et l'utilisation de technologies avancdes.

D'une part, les seuls acteurs prdsents dans cette phase de fabrication sont en rralit les fabricants, et les autres acteurs (designers, utilisateurs, etc..) n'ont accds au produit qu'une fois sa production terminde.

Le DIT peut rencontrer des ddfis majeurs lorsque le processus de fabrication n'est pas considrd comme une partie intgrde du projet collaboratif. Ici, la conception est mise en avant, tandis que la fabrication est traitde comme une dtape distincte, rralisde par des acteurs spcialisds. Cela entraîne un manque de synergie entre les diffdrrentes phases du projet, et peut compromettre la qualit du produit final. Il apparaît comme ncessaire de permettre une interaction de l'ensemble des acteurs de la conception et de la fabrication avec le produit pendant la phase de fabrication.

Dans ce contexte, ce travail de thse va chercher à s'intdrresser à l'interaction avec le produit par tous les acteurs au cours du processus de fabrication. Cela va passer d'une part par l'observabilit de l'État du produit durant toute sa phase de production, et par le respect de la conformit des exigences issues de ces diffdrrents acteurs durant la fabrication.

D'autre part, la partie « open » de l'open-manufacturing n'est pas mise en place. En effet, un des objectifs de l'open-manufacturing est la capacit de n'importe quel acteur à devenir un « maillon » de la chaine de production, c'est-à-dire ici que n'importe quel fabricant, utilisant n'importe quelle machine de fabrication (ici n'importe quelle imprimante 3D) puisse participer à la fabrication du produit pour obtenir un produit final identique. Ici, on ne peut pas garantir que n'importe quel acteur de la chaine de fabrication soit « interchangeable », ou de manidre quivalente garantir que deux produits, issus de la mme chaine de co-conception, et rralisds par deux acteurs de la fabrication diffdrrents, soient identiques, du fait de diffdrrences de process, matrdiau, outillage, etc...

Pour répondre à cette problématique, ce travail de thèse va s'intéresser à la mise en place d'une commande basée sur l'état du produit, afin de permettre un contrôle de l'état du produit pendant toute la phase de fabrication, et de garantir une pièce finale validant les mêmes exigences peu importe le maker et ses machines de production.

Ce qu'il faut retenir des limites du DIT

- L'approche Do-It-Together présente des défis en matière de conception et de fabrication interdisciplinaires. Les différences d'engagement parmi les participants peuvent entraîner des déséquilibres dans la répartition des tâches et la qualité du travail collaboratif. Les changements fréquents de membres de l'équipe peuvent également entraîner une perte de continuité et de connaissance collective, impactant la qualité du projet.
- En ce qui concerne la fabrication, l'open-manufacturing dans le cadre du projet INEDIT n'a pas été pleinement intégré dans le processus collaboratif, limitant l'inclusion des acteurs et la collaboration tout au long de la production. Cela a conduit à un manque de synergie entre la conception et la fabrication, rendant le processus moins efficace.
- Le travail de thèse s'intéresse à améliorer l'interaction entre tous les acteurs pendant la phase de fabrication et à garantir la conformité aux exigences des différentes parties prenantes. En contrôlant l'état du produit pendant toute la production, il est possible d'obtenir une pièce finale qui respecte les mêmes exigences, peu importe les acteurs impliqués.

1.5 Conclusion

Le Do-It-Together a prouvé son efficacité en tant que processus de conception collaborative, notamment à un niveau global grâce aux dispositifs immersifs et à la plate-forme Do-It-Together. Néanmoins, des obstacles apparaissent pour rendre ce type de processus opérationnel en phase de fabrication dans un écosystème large avec des infrastructures et des acteurs distribués. L'intégration des différentes phases du projet et la reconnaissance de la valeur de la collaboration tout au long du processus de fabrication sont essentielles pour exploiter pleinement le potentiel du Do-It-Together dans la réalisation de projets collaboratifs.

Pour assurer cette intégration d'un écosystème collaboratif distribué, il est nécessaire de maintenir de manière virtuelle un suivi du produit tout au long de sa conception et de sa fabrication, afin que

l'ensemble des différents acteurs puissent suivre le produit et interagir avec lui en temps-réel. Cela implique notamment que cet objet virtuel doit représenter convenablement le produit en temps-réel.

Nous allons donc nous intéresser, dans les prochains chapitres de ce manuscrit, à mettre en place un objet virtuel capable de représenter fidèlement et de communiquer avec le produit, en temps réel, tout au long de sa fabrication.

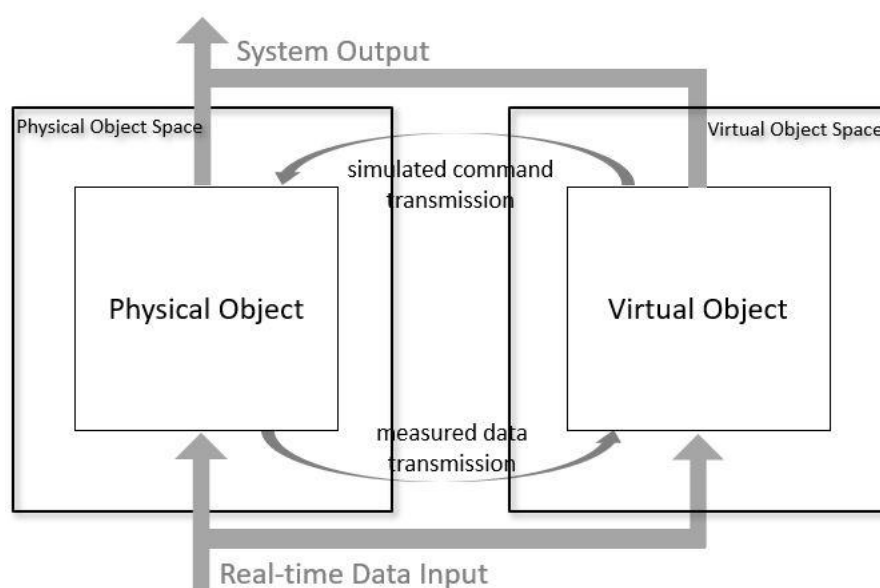
En ce sens, la suite de ce travail de thèse va s'intéresser à l'utilisation d'un outil en particulier, le Jumeau Numérique, afin de servir d'objet intermédiaire de conception et de fabrication. Ainsi, les chapitres suivants vont d'abord s'intéresser à la notion de Jumeau Numérique, ainsi que son utilisation pour représenter et interagir avec le produit tout au long du processus de fabrication (Chapitre 2), puis à comment ce Jumeau Numérique peut permettre une réelle observabilité du produit durant sa phase de fabrication, de façon à ce que l'état du produit et ses exigences de conception soient les pilotes de son processus de fabrication, permettant ainsi de réaliser une application du paradigme du Système Contrôlé par le Produit (SCP) en temps réel (Chapitre 3).

Dans le contexte du projet européen INEDIT, ce travail de recherche se focalisera notamment sur une application dans le cadre d'un processus de fabrication additive plastique (FFF).

CHAPITRE 2.

LE JUMEAU NUMERIQUE, UN OUTIL POUR L'INGENIERIE COLLABORATIVE

Représentation du Jumeau Numérique d'un système physique



2.1 Introduction du chapitre 2

L'essor d'outils numériques dans l'industrie a déclenché une évolution des moyens et méthodes de production au cours des dernières années. Leur développement a permis aux différents acteurs (concepteurs, fabricants, utilisateurs, ...) du processus de création de produits (conception, fabrication) de communiquer autour d'un objet commun, acquérir et partager des informations, et gérer les produits de manière plus précise à chaque phase de leur cycle de vie. Cette numérisation est ainsi perçue comme une opportunité pour atteindre des niveaux plus élevés de productivité et d'efficacité. Au cœur de cette évolution technologique se trouve une technologie émergente pour le fonctionnement des systèmes techniques : les Jumeaux Numériques (Qi *et al.*, 2019; Tao *et al.*, 2019).

Ce chapitre s'inscrit dans une démarche méthodologique offrant un cadre conceptuel s'intéressant à la possibilité d'employer cet outil pour permettre un suivi du produit et une interaction multi-acteurs avec lui pendant la phase de fabrication, afin de passer d'une démarche d'open-manufacturing à une démarche de fabrication collaborative.

La littérature scientifique montre un développement important des Jumeaux Numériques depuis une dizaine d'années, mais soulève également plusieurs problèmes, dont notamment un manque de clarté sur ce qu'est un Jumeau Numérique et comment le définir. Dans ce but, un travail d'analyse systématique de la littérature portant sur les Jumeaux Numériques a été réalisé (Pronost *et al.*, 2021, 2023) pour examiner les possibilités d'implémentation d'un Jumeau Numérique comme un artefact collaboratif en conception et en fabrication, et avec une attention particulière portée sur les limitations de l'implémentation de ce Jumeau Numérique dans ces deux contextes. Ce travail a révélé un manque de clarté dans la littérature concernant la définition d'un Jumeau Numérique. Nous avons ainsi démontré que seulement 19 % des applications industrielles référencées comme « Jumeau Numérique » dans la littérature répondent réellement à cette définition.

Une première section entreprend de définir le concept de Jumeau Numérique, en s'intéressant aux définitions existantes puis en proposant une classification des Jumeaux Numériques et une analyse des différentes applications de ces Jumeaux tout au long du cycle de vie d'un produit.

Les deuxièmes et troisièmes sections de ce chapitre se consacreront à l'étude de l'implémentation du Jumeau Numérique en tant qu'objet intermédiaire de conception et en tant qu'objet intermédiaire de fabrication dans le contexte de pratiques collaboratives, ainsi qu'aux limites des applications du Jumeau Numérique dans ce contexte, et notamment pendant la phase de fabrication.

2.2 Le Jumeau Numérique : définition, composition et applications

2.2.1 Le concept de Jumeau Numérique : origine et définitions en recherche et en industrie

Les origines du concept de « Jumeau Numérique », et l'un de ses exemples les plus célèbres, se trouvent dans le programme Apollo mené par la NASA entre 1961 et 1972, et plus précisément lors de la mission Apollo 13. Dans leur livre retraçant l'histoire de cette mission (Lovell and Kluger, 1994), Jeffrey Kluger et James Lovell, ancien commandant de la mission, ont décrit comment les ingénieurs de la NASA ont construit une réplique physique de la navette spatiale, afin d'entraîner les astronautes à faire face à différentes anomalies de vol dans un environnement simulé avant la mission. Après deux jours de vol, un réservoir d'oxygène de la navette spatiale a explosé, privant en même temps la navette de la plupart de ses batteries. En utilisant le modèle physique « miroir » de la navette et l'environnement simulé, la NASA a pu modéliser, tester et trouver une solution avant d'instruire les astronautes sur la manière d'appliquer cette solution sur la vraie navette. Cela a permis aux trois astronautes de revenir vivants sur Terre.

Ce système, en tant qu'objet physique fournissant des informations à son homologue virtuel, représentant l'état actuel du système réel, puis effectuant des simulations avant d'envoyer une commande de contrôle au système réel, forme la base d'un futur Jumeau Numérique.

Il a fallu 30 ans pour réintroduire l'utilisation de ce concept, repris en 2002 par Michael Grieves à l'Université du Michigan lors d'un cours de formation sur la Gestion du Cycle de Vie des Produits (ou PLM), et présenté comme un " Conceptual Ideal for PLM " (Grieves, 2014, 2016). Ce modèle a ensuite été appelé " Mirrored Space Model " dans le travail du Dr Grieves, jusqu'à ce que le terme de "Digital Twin" soit introduit par la NASA (Glaessgen and Stargel, 2012) et largement accepté dans la communauté scientifique.

Jumeau Numérique : (Glaessgen and Stargel, 2012)

« A Digital Twin is an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin. The Digital Twin is ultra-realistic and may consider one or more important and interdependent vehicle systems, including airframe, propulsion and energy storage, life support, avionics, thermal protection, etc. »

La définition présentée ci-avant sert de base à la plupart des définitions actuelles des jumeaux numériques, mais elle reste d'une part spécialisée pour un domaine en particulier – l'aéronautique – et reste surtout assez peu précise sur la nature en elle-même du Jumeau. En effet, elle décrit les capacités que doit avoir ce Jumeau Numérique sans rentrer dans le détail de comment celles-ci sont mises en place. L'emploi du terme « *to mirror* » (en français « refléter ») pour expliquer la fonction du Jumeau, ne permet pas de définir clairement avec quel degré de précision, ou quel délai de temps (S'agit-il de temps réel ? Cette représentation est-elle continue ou discrète ?) ce « reflet » doit être réalisé. Un premier objectif de ce chapitre va donc être de chercher à définir plus précisément la définition du ou des différents Jumeaux Numériques.

De nombreux travaux ont largement contribué à l'évolution du concept original de Jumeau Numérique à partir de la définition de Glaessgen et Stargel. Comme le montre une revue de la littérature sur le sujet, l'une des conséquences est la profusion de nouvelles définitions qui varient en fonction des approches utilisées et/ou des domaines d'application visés (Boje *et al.*, 2020). Il convient cependant de noter que certaines de ces définitions se sont éloignées de la définition originale, générant de la confusion et un manque de consensus quant au sens attribué au terme de Jumeau Numérique.

Comme présenté précédemment, même si la définition produite par la NASA (Glaessgen and Stargel, 2012) est la définition la plus courante dans la littérature, il existe de nombreuses autres définitions des Jumeaux Numériques, généralement adaptées à chaque domaine d'application (Barricelli, Casiraghi and Fogli, 2019).

Les Jumeaux Numériques sont souvent définis dans la littérature comme un ensemble de trois parties (Tao, Cheng, *et al.*, 2018; Madni, Madni and Lucero, 2019) :

1. Un modèle d'objet ;
2. Un ensemble évolutif de données relatives à l'objet ;
3. Un moyen de mettre à jour ou d'ajuster dynamiquement le modèle en fonction de ces données.

Malgré cela, dans certaines applications, l'objet physique n'est même pas pris en compte, et le Jumeau Numérique est défini comme une entité virtuelle, sans lien apparent avec un objet ou un système réel (Qi and Tao, 2018). Même John Vickers, principal expert en fabrication de la NASA et directeur du National Center for Advanced Manufacturing de la NASA, a déclaré que « *la vision ultime du Jumeau Numérique est de créer, tester et construire notre équipement dans un environnement virtuel* ». Cela soulève la question de la nécessité d'une contrepartie physique dans la définition d'un Jumeau Numérique. De plus, une majorité des articles définissant le Jumeau Numérique ne mentionnent pas

l'existence d'une communication, d'un échange d'informations entre l'objet physique et le modèle virtuel (Negri, Fumagalli and Macchi, 2017). Certains auteurs expriment également la nécessité d'un contrôle, partiel ou total, de l'objet physique pour considérer le système comme un Jumeau Numérique (Julien and Martin, 2021, 2022).

Cette imprécision des différentes définitions, et les contradictions existantes entre certaines d'entre elles, peut poser un problème de compréhension à la lecture d'un article ou d'un document scientifique mentionnant le terme « Jumeau Numérique ». Il semble nécessaire de disposer d'un formalisme des Jumeaux Numériques, pour pouvoir les trier, les organiser, et les distinguer facilement.

2.2.2 Vers une étude de la composition et une classification des Jumeaux Numériques

Le principal problème découlant de la volonté de déterminer une définition formelle et universelle pour les Jumeaux Numériques, est que, comme indiqué par (Madni, Madni and Lucero, 2019) « *today any digital version of a system, component, or asset is called a digital twin* ». En effet, une croissance exponentielle des apparitions du terme « Digital Twin » peut être aperçue dans la littérature scientifique et dans l'industrie depuis une dizaine d'années (Pronost *et al.*, 2023).

Ce terme populaire a donc tendance à être rattaché à plusieurs outils et à plusieurs domaines et applications différentes. Dans ce contexte, tenter de proposer une définition générale des jumeaux numériques pour tenter d'englober la plupart des définitions contradictoires existantes dans une définition générale n'est pas envisageable, car cela soulèverait des paradoxes et aboutirait à une définition imprécise. Ainsi, dans cette partie, une autre approche a été réalisée : classer les jumeaux numériques en une série de catégories.

En effet, l'établissement d'une classification permet de distinguer le groupe hétérogène actuel des jumeaux numériques en une série de catégories plus précises, et de pouvoir proposer pour chacune de ces catégories une définition précise de la nature de ces jumeaux numériques et de leurs applications.

Cette section présente la mise en œuvre de ce travail de classification. Une recherche bibliographique a permis d'identifier différentes méthodes de classification ou de différenciation des Jumeaux Numériques, ce qui a permis de proposer un nouvel ensemble de critères de classification de ces derniers (Pronost *et al.*, 2021).

2.2.2.1 Détermination des critères de classification

En rassemblant et en s'inspirant de différentes classifications de la littérature (Meyer, Främling and Holmström, 2009; Kritzinger *et al.*, 2018; Agnusdei, Elia and Gnoni, 2021; Julien and Martin, 2021), nous avons établi une liste de critères de classification pour catégoriser les jumeaux numériques. Ces différents critères sont :

1. Présence d'un système physique : le modèle numérique étudié peut ou non avoir une contrepartie physique dont il sert de représentation.
2. Mise à jour automatique du modèle : les données collectées sur le système physique peuvent alimenter automatiquement le modèle numérique. Sinon, le modèle ne sera mis à jour qu'avec les informations du système physique manuellement, par décision de l'utilisateur.
3. Contrôle du système physique : les informations provenant de l'exécution du modèle numérique peuvent être automatiquement transmises au système physique en tant que commande du système physique. Sinon, il n'y aura pas de communication automatisée entre le modèle numérique et son homologue physique.
4. Adaptation aux préférences de l'utilisateur : l'interface utilisateur adaptative est sensible aux préférences et priorités de l'opérateur.
5. Conscience de son environnement : le Jumeau Numérique peut avoir une capacité d'apprentissage pour discerner les objets et les modèles rencontrés dans l'environnement opérationnel.

2.2.2.2 Hypothèses retenues pour la classification

Plusieurs hypothèses ont été formulées dans le cadre de cette étude, afin d'identifier les critères de classification pertinents pour ce travail, ainsi que les relations entre ces critères.

On considérera dans cette étude qu'il ne peut y avoir de communication entre l'objet physique et l'objet virtuel que si les deux existent en même temps, c'est-à-dire si un objet physique est présent. Cela implique que les critères 2 et 3 établis précédemment dépendent du critère 1, la présence ou non d'une pièce physique.

En outre, il sera également considéré ici que l'on ne peut pas avoir de contrôle automatique de l'objet virtuel à l'objet physique sans avoir une communication automatique de l'objet physique à l'objet virtuel. En effet, sans connaissance de l'état du système physique, il n'est pas possible de le contrôler.

Enfin, comme les recherches sur les jumeaux numériques sont assez récentes, l'intérêt se concentre principalement sur les trois premières fonctions mentionnées ci-dessus, et les fonctions « Adaptation aux préférences de l'utilisateur » et « Conscience de l'environnement environnant » ne sont pas vraiment prises en compte pour le moment, car l'élaboration de leurs prérequis est encore en cours.

2.2.2.3 Réalisation d'un arbre de décision pour la classification des jumeaux numériques

À l'aide de ces critères, un guide méthodologique a été produit et présenté sous la forme d'un arbre de décision, présenté Figure 7. Il permet de déterminer à la lecture d'un document scientifique traitant des « Jumeaux Numériques » la sous-catégorie à laquelle appartient le Jumeau Numérique mentionné.

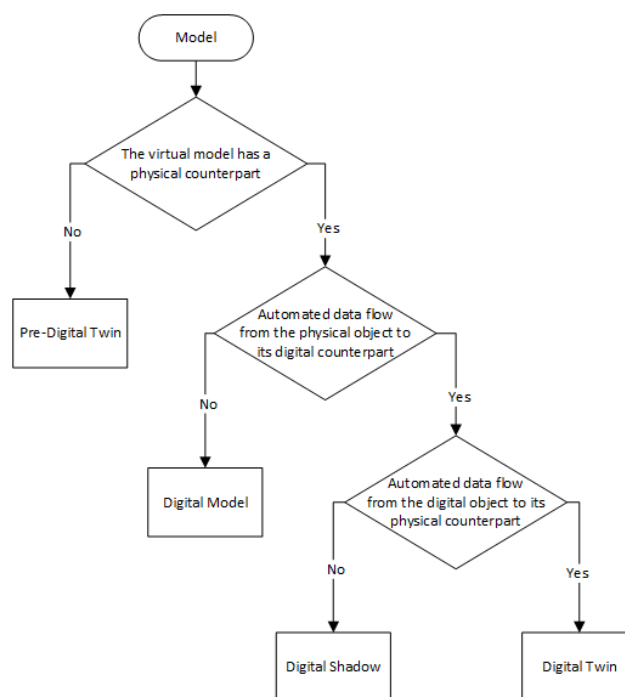


Figure 7 : Arbre de décision des sous-catégories de jumeaux numériques

Cette classification nous permet d'identifier 4 sous-catégories de Jumeaux Numériques, chacun présentant une composition différente (*Pre-Digital Twin*, *Digital Model*, *Digital Shadow*, *Digital Twin*).

En se servant de cette grille de lecture, la suite de ce travail de thèse a consisté à réaliser une revue systématique des applications des Jumeaux Numériques dans la littérature, afin d'identifier les leviers et les obstacles pour soutenir la diffusion et l'implémentation des Jumeaux Numériques, notamment pour des applications industrielles ou de fabrication, d'un point de vue technologique, opérationnel et social.

Ce travail s'inspire ici notamment des travaux réalisés par Semeraro et al. (Semeraro *et al.*, 2021) et Liu et al. (Liu *et al.*, 2020), qui ont établi une liste préliminaire des différentes applications des Jumeaux Numériques dans le contexte du secteur manufacturier, avec comme différences notables d'une part la taille de l'échantillon d'étude et d'autre part la volonté d'observer la composition des Jumeaux Numériques pour chaque application, en se servant de la grille de lecture proposée dans la première partie de cette section.

En considérant la durée de vie d'un produit, nous avons établi, sur la base de la littérature (Liu *et al.*, 2020; Lo, Chen and Zhong, 2021; Semeraro *et al.*, 2021) que son cycle de vie peut être divisé en quatre phases du cycle de vie successives distinctes :

1. Phase de création/conception du système
2. Phase de fabrication/production
3. Phase de fonctionnement/d'usage
4. Fin de vie

Ensuite, afin de mieux classer les applications du Jumeau Numérique lors de chacune de ces phases, une liste exhaustive de ces applications est proposée pour chaque phase. Cette liste s'appuie sur les travaux de Liu et al. (Liu *et al.*, 2020), qui a proposé une classification des applications fondée sur une revue systématique des applications industrielles des jumeaux numériques tout au long du cycle de vie du produit. Dans le cadre de cette étude, la classification de Liu sera utilisée comme première étape, pour identifier la proportion de chaque application de jumeaux numériques dans la littérature actuelle. Puis, dans un second temps l'objectif est d'observer pour chacune de ces applications, la typologie des Jumeaux Numériques qui est utilisée.

Cette étude présente plusieurs résultats dont une analyse plus approfondie est pertinente.

Tout d'abord, lorsque l'on s'intéresse à la répartition des travaux portant sur les Jumeaux tout au long du cycle de vie d'un produit, on s'aperçoit que la majeure partie de ces travaux portent sur les phases de fabrication (116 études) et les phases d'usage (56 études) du produit considéré, là où peu d'applications apparaissent en phase de conception (14 études) et en fin de vie (1 étude). Ces résultats sont rapportés sur la Figure 8.

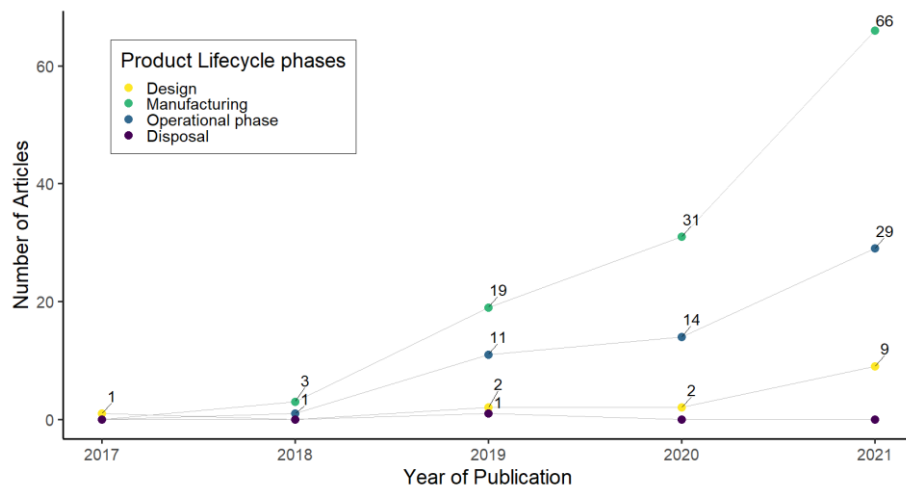


Figure 8 : Nombre d'articles sur le Jumeau Numérique dans chaque phase du cycle de vie par année de publication

Néanmoins, comme montre cette figure, malgré une grande proportion d'applications en phase de fabrication et d'usage, des applications commencent à apparaître récemment dans la phase de conception. On voit que le développement des jumeaux numériques commence à s'étendre au-delà de ces quelques applications traditionnelles, mais cela reste un développement émergent.

D'autre part, lorsque l'on s'intéresse à la nature (comprendre la catégorie, le type) de Jumeau Numérique, on remarque, comme le montre la Figure 9, que presque tous les Jumeaux Numériques utilisés dans la phase de conception sont en réalité des *Pre-Digital Twin* ou des *Digital Models*, c'est-à-dire des modèles sans contact direct avec un objet physique, qui ne peuvent donc pas le représenter fidèlement au cours du temps (Pronost *et al.*, 2021). Cela peut sembler intuitif, car l'objet physique n'est pas encore en phase de fabrication, il n'est pas encore tangible, il est complexe d'acquérir des données issues du monde physique sur celui-ci.

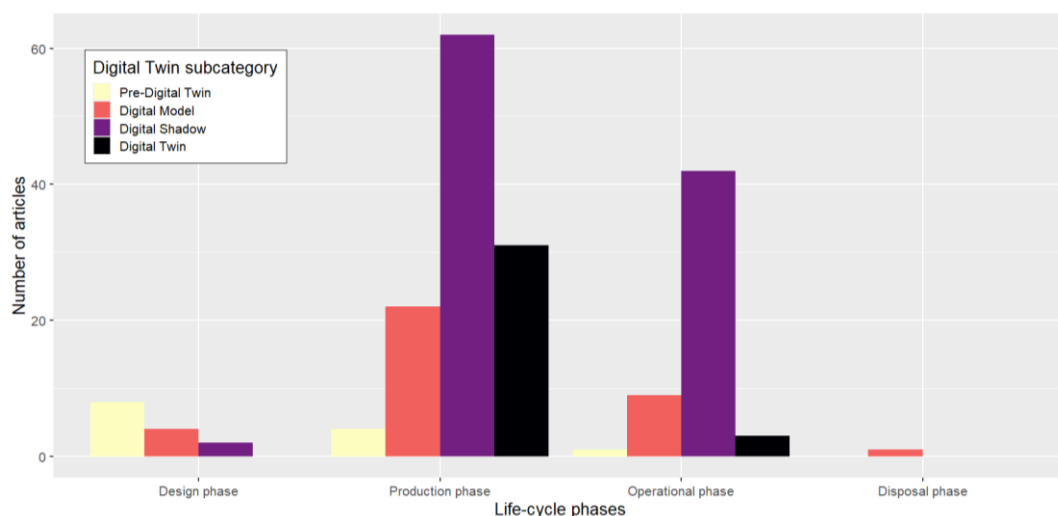


Figure 9 : Proportion de chaque sous-catégorie de Jumeau Numérique, tout au long du cycle de vie du produit

La revue de littérature que nous avons menée a également permis de dresser un état des lieux de l'utilisation du Jumeau Numérique, notamment dans le domaine manufacturier, qui est le socle d'application de ce travail de thèse. Ces travaux ont identifié les principales applications des Jumeaux Numériques, qui concentrent une grande partie des recherches menées sur ce sujet. Par ailleurs, nous avons pu observer une quasi-absence d'applications des jumeaux numériques dans la phase de fin de vie, indiquant un besoin d'efforts communautaires accrus pour développer la recherche sur les Jumeaux Numériques tout au long du cycle de vie. En ce qui concerne la phase de fabrication, les applications les plus courantes concernent essentiellement à ce jour la planification de la production, le contrôle et la maintenance prédictive (Pour plus de détails sur les applications, voir Annexe 5). Les études montrent également que les Jumeaux Numériques sont principalement utilisés à une échelle locale pour des fonctions spécifiques, limitant ainsi leur potentiel d'utilisation tout au long du cycle de vie du produit. Ainsi, une meilleure compréhension et une approche collaborative sont essentielles pour exploiter pleinement les Jumeaux Numériques tout au long du cycle de vie des produits. Cette revue systématique confirme l'analyse de Rasheed *et al.* (Rasheed, San and Kvamsdal, 2020) en ce sens qu'il existe encore des obstacles aux Jumeaux Numériques d'un point de vue technologique, comme l'acquisition parfois complexe de données issues du produit physique représenté. Dans le contexte des applications industrielles, les résultats confirment que le déploiement des Jumeaux Numériques n'en est encore qu'à ses balbutiements car la réalisation d'un véritable *Digital Twin* repose sur la connexion bidirectionnelle entre l'objet physique et son équivalent numérique, qui n'est jusqu'ici pas exploité pleinement dans les applications actuelles. Ce flux de données, en particulier de l'objet physique à l'objet numérique, doit fournir des données pertinentes et en temps suffisamment court afin d'être une représentation fiable du système physique.

La suite de ce chapitre va s'intéresser à l'utilisation de ces différentes formes de Jumeaux Numériques comme artéfacts collaboratifs en phases de conception et de fabrication d'un produit.

Ce qu'il faut retenir sur le Jumeau Numérique
Le Jumeau Numérique facilite la collaboration dans la conception et la fabrication en accélérant le processus et en reliant les équipes pluridisciplinaires. Il fournit une plateforme de travail en temps réel, permettant aux membres de l'équipe de collaborer sur le même projet, d'apporter des modifications instantanément et de partager des idées.

2.3 Jumeau Numérique et pratiques collaboratives en phase de conception

L'intégration des Jumeaux Numériques dans les processus collaboratifs de conception et de fabrication représente une avancée significative dans l'ingénierie moderne. Ces entités virtuelles agissent comme des ponts entre la conception et la fabrication, facilitant la communication entre les différents acteurs impliqués. Cette section examine l'implémentation d'un Jumeau Numérique en tant qu'outil central pour des pratiques collaboratives, en se concentrant sur son usage en phase de conception.

2.3.1 Le Jumeau Numérique comme outil pour les pratiques collaboratives

La conception collaborative de produits implique, comme cela a été présenté dans le premier chapitre de ce manuscrit, des équipes ou acteurs pluridisciplinaires travaillant simultanément sur des aspects différents d'un produit. L'introduction du Jumeau Numérique en tant qu'objet intermédiaire au cœur de ce processus offre une plateforme novatrice pour améliorer la communication, favoriser la compréhension commune et accélérer le cycle de conception. Cette section explore la manière le Jumeau Numérique a été appliqué dans la littérature dans le cadre de cette conception collaborative de produits.

Dans un contexte de conception collaborative, où les membres de l'équipe peuvent être dispersés géographiquement et posséder des expertises diverses, le Jumeau Numérique d'un prototype d'un produit, au sein d'une plateforme virtuelle, permet aux différents acteurs de la conception un accès à l'ensemble du projet, afin de travailler ensemble de manière transparente, partageant des perspectives complémentaires et contribuant à la richesse du processus de conception (Kaarlela *et al.*, 2022). Le Jumeau Numérique fonctionne ainsi comme une plateforme de collaboration en temps réel. Il agit comme une représentation virtuelle unifiée du produit en cours de conception. Il offre aux membres de l'équipe une visualisation partagée, éliminant les barrières linguistiques ou conceptuelles qui peuvent souvent entraver la communication. Les membres de l'équipe peuvent travailler simultanément sur le modèle, partager des idées, et apporter des modifications en temps réel.

Une des caractéristiques clés du Jumeau Numérique est sa capacité à conserver un historique des versions et des états antérieurs du produit. Cela offre une traçabilité complète des évolutions du design, facilitant la gestion des changements et des révisions. Les équipes peuvent remonter dans le temps pour examiner les itérations précédentes, comprendre l'évolution du produit, et prendre des décisions informées sur la base de l'historique de conception.

Le Jumeau Numérique peut intégrer des analyses pluridisciplinaires, permettant aux différents experts de contribuer à la conception en fonction de leurs domaines de compétence. Par exemple, des simulations thermiques, mécaniques ou de fluides peuvent être incorporées, offrant une compréhension approfondie des performances du produit. Cela favorise une approche holistique de la conception, où les décisions sont prises en tenant compte de plusieurs aspects simultanément.

Les travaux de Wu et al. (Wu *et al.*, 2022) sur l'utilisation du Jumeau Numérique dans le cadre d'une approche de conception pluridisciplinaire illustrent ces avantages en décomposant la collaboration pluridisciplinaire en phase de conception en trois étapes successives :

1. *Conceptual Design* : Cette phase constitue la première étape de la conception de produit. Durant cette étape, les acteurs doivent définir de manière compréhensive les fonctions du produit. Cela passe par l'acquisition et l'analyse de données extérieures (clients, générations antérieures du produit, ...). Dans ce contexte, le Jumeau Numérique est utilisé comme un modèle accessible par tous les acteurs sur lequel va être construit le produit dans les phases suivantes de la conception.
2. *Detailed design* : Dans cette seconde phase, des modélisations multiphysiques du produit sont réalisées pour chaque domaine de spécialisation (mécanique, électronique, automatique, ...) afin de concevoir les différents organes technologiques du produit. Le Jumeau Numérique sert ainsi de modèle multiphysique sur lequel les différents acteurs peuvent travailler simultanément.
3. *Virtual verification* : Une fois le modèle multiphysique établi, le Jumeau Numérique permet de vérifier en situation « réelle » le comportement du produit modélisé, grâce notamment aux données issues de la réalité collectées dans la première partie de la conception, afin de confronter le prototype virtuel à des situations les plus proches possibles de la réalité.

Ces étapes sont représentées Figure 10.

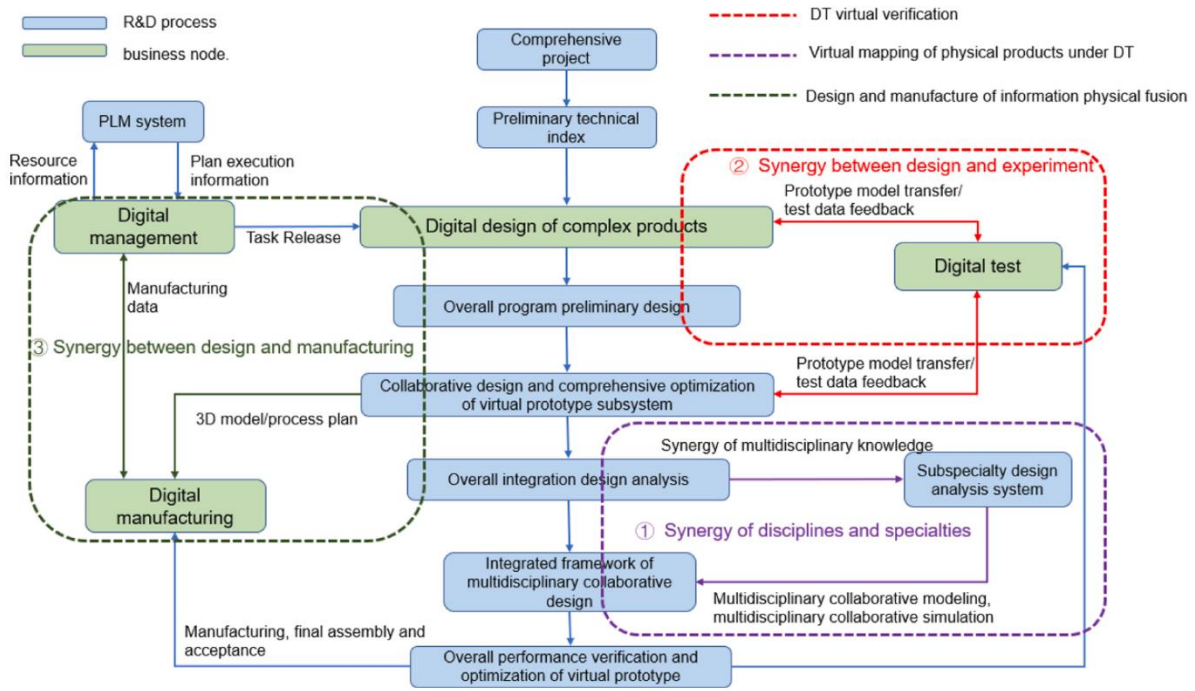


Figure 10 : Digital collaborative design process of complex products (Wu et al., 2022)

En conclusion, le Jumeau Numérique apparaît comme un objet intermédiaire de conception (Boujut and Blanco, 2003) essentiel dans le contexte d'une conception collaborative de produits. Sa capacité à fournir une visualisation commune, à faciliter la collaboration en temps réel, à gérer efficacement les versions, à surmonter les barrières géographiques et disciplinaires, ainsi qu'à intégrer des analyses pluridisciplinaires, en font un catalyseur puissant pour l'efficacité et la qualité dans le processus de conception collaboratif.

2.3.2 Le Jumeau Numérique comme plateforme pour la collaboration

D'autres travaux, notamment (Cimino, Negri and Fumagalli, 2019; Segovia and Garcia-Alfaro, 2022; Reim, Andersson and Eckerwall, 2023) explorent comment le Jumeau Numérique peut être implémenté non seulement comme un outil, mais aussi comme une plateforme permettant d'intégrer l'ensemble des acteurs de la conception d'un produit de façon à ce qu'ils interagissent collaborativement, comme présenté à la Figure 11.

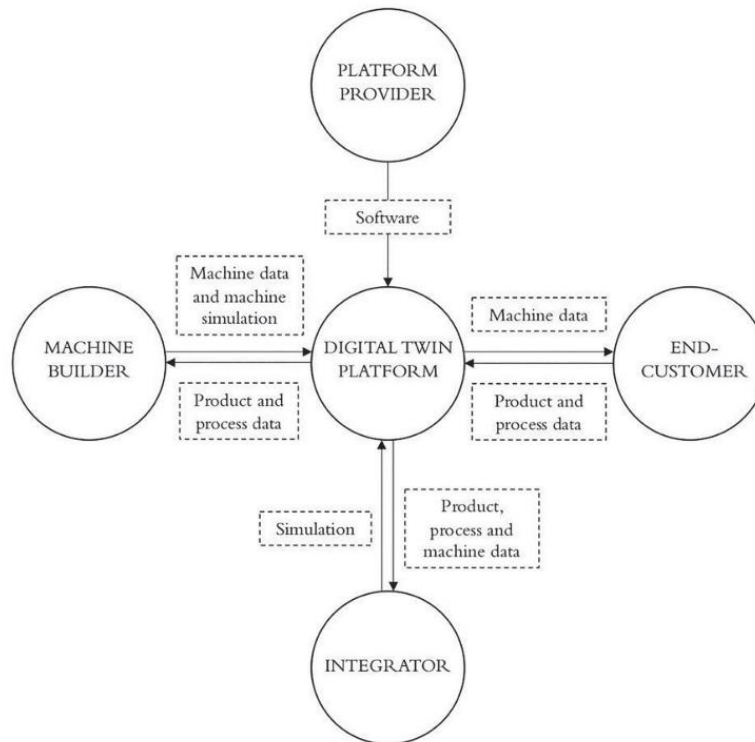


Figure 11 : Vue d'ensemble de la collaboration autour des jumeaux numériques, par (Reim, Andersson and Eckerwall, 2023)

Le Jumeau Numérique agit comme un pont entre les différents domaines d'expertise des équipes de conception, intégrant des analyses pluridisciplinaires telles que des simulations thermiques, mécaniques ou de fluides. En tant qu'outil central de conception, il améliore l'efficacité et la qualité des processus de conception collaborative, en permettant à chaque utilisateur l'accès à l'ensemble des informations sur le produit (Reim, Andersson and Eckerwall, 2023).

Synthèse : usage du Jumeau Numérique pour les pratiques collaboratives en conception

- Le Jumeau Numérique facilite la collaboration dans la conception et la fabrication en accélérant le processus et en reliant les équipes pluridisciplinaires. Il fournit une plateforme de travail en temps réel, permettant aux membres de l'équipe de collaborer sur le même projet, d'apporter des modifications instantanément et de partager des idées.
- Le Jumeau Numérique conserve également un historique des versions et des états antérieurs du produit, aidant à gérer les modifications. Il peut intégrer des analyses pluridisciplinaires, donnant aux équipes une vue complète des performances du produit.

2.4 Usage du Jumeau Numérique pour faciliter une collaboration en phase de fabrication

Comme on a pu le voir dans le premier chapitre, le principal problème apparu dans l'application du Do-It-Together s'est révélé être la mise en place d'un travail collaboratif entre les différents acteurs en phase de fabrication. Dans cette partie de ce chapitre, nous nous intéressons à l'usage du Jumeau dans cette phase en particulier et comment ce Jumeau Numérique pourrait être utilisé pour favoriser la collaboration de différents acteurs.

2.4.1 Le Jumeau Numérique comme objet intermédiaire de fabrication collaborative

Pendant la production, le Jumeau Numérique peut servir d'outil de suivi en temps réel. D'après les résultats de notre état de l'art, c'est là l'un de ses principaux usages en phase de production. Pour ce faire, les capteurs et les données issues de la chaîne de production sont intégrés dans le modèle virtuel, permettant aux équipes de surveillance de suivre les performances d'un système de production en direct (Bouزيد, Viarouge and Cros, 2020; Cao, Zhao and Xiao, 2020; Alizadehsalehi and Yitmen, 2021; Yang, Zheng and Li, 2022). Des alertes peuvent être déclenchées pour indiquer des anomalies, facilitant la mise en place de mesures correctives rapides (He *et al.*, 2019; Deebak and Al-Turjman, 2021). Cette approche proactive contribue à une maintenance préventive, réduisant les temps d'arrêt non planifiés.

Les travaux de Kaarlela et al. (Kaarlela *et al.*, 2022) et de Guo et al. (Guo *et al.*, 2021) notamment montrent l'intérêt de ce suivi en temps-réel pour l'aspect collaboratif en fabrication. En effet, l'utilisation du Jumeau pendant la fabrication d'un objet permet le suivi de son état physique à l'aide des données recueillies et interprétées pendant le processus de fabrication par l'ensemble des acteurs qui peuvent ensuite interagir autour des données et prendre des décisions en temps-réel pour influencer sur ce processus.

La collaboration facilitée par le Jumeau Numérique s'étend également à l'optimisation des processus de fabrication. Les équipes peuvent travailler de manière collaborative pour identifier des améliorations potentielles, ajuster les flux de travail, et éliminer les goulots d'étranglement (Liu *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2020; Leng *et al.*, 2021). Dans ce contexte, on s'intéresse alors plutôt à l'optimisation du moyen de production pendant sa phase d'usage qu'au produit en lui-même pendant sa phase de fabrication.

Il semble donc que le Jumeau Numérique soit déjà utilisé dans le cadre de la phase de fabrication d'un produit en tant qu'objet intermédiaire de fabrication, permettant d'améliorer la collaboration entre les différents acteurs responsables de la création du produit.

2.4.2 Limites de l'application du Jumeau Numérique pour des pratiques collaboratives en fabrication

Bien que le Jumeau Numérique présente plusieurs arguments pour son intégration en tant qu'outil au service d'une conception et d'une fabrication collaborative, il est important de reconnaître certaines limites inhérentes à son utilisation. Cette section explore les défis majeurs associés à l'utilisation du Jumeau Numérique dans le contexte d'une fabrication collaborative.

Tout d'abord, l'intégration des données provenant de différentes sources et systèmes est une limite du Jumeau Numérique. Dans un environnement collaboratif, les équipes peuvent utiliser une variété de logiciels et de plateformes pour leurs tâches spécifiques. Assurer une interopérabilité efficace entre ces systèmes peut être un défi, et soulève également des questions quant à la propriété de la donnée (Fuller *et al.*, 2020). La synchronisation en temps réel des données entre le Jumeau Numérique et les processus de fabrication réels peut poser des défis. Les délais de transmission, les retards dans la mise à jour des informations et les problèmes de latence peuvent entraîner des écarts entre la représentation virtuelle et la réalité physique. Ces écarts peuvent affecter la prise de décision en temps réel et compromettre la réactivité du système.

Le second problème associé à l'application du Jumeau Numérique comme objet intermédiaire de fabrication, c'est à dire comme artéfact représentant et interagissant avec le produit tout au long de sa fabrication, est justement ce lien avec le produit. En effet, la modélisation précise et détaillée nécessaire pour créer un Jumeau Numérique du produit peut être une tâche complexe et exigeante. La représentation fidèle du produit physique, avec toutes ses caractéristiques et ses interactions, peut nécessiter des ressources importantes en termes de temps et de compétences. Le choix technologique réalisé dans la quasi-totalité des applications du Jumeau Numérique étudiées est de se servir de données issues des machines de fabrication pour suivre la fabrication du produit (Pronost *et al.*, 2023). Le Jumeau Numérique n'est donc pas jumelé au produit, mais à la machine ou à la chaîne de fabrication associée à la fabrication du produit.

Le Jumeau Numérique n'observe pas le produit mais la machine. Il ne commande pas le produit, mais la machine.

Cela implique qu'on ne peut pas vérifier l'état du produit tout au long de sa fabrication, mais uniquement que la machine réalise correctement la série de tâches qui lui est commandée. Si ces tâches ont été mal implémentées pour la réalisation attendue du produit, le produit fabriqué sera différent du produit imaginé en conception. De la même manière, si le modèle {Machine-Produit} ne

représente pas fidèlement la réalité, le produit fabriqué sera différent du produit imaginé en conception.

De plus, notre étude bibliographique (Pronost *et al.*, 2023) montre que les Jumeaux sont principalement utilisés à une échelle locale, pour une fonction spécifique définie par un besoin d'implémentation immédiat. Nous avons également constaté que les Jumeaux Numériques sont encore considérés comme des solutions complémentaires, qui sont ajoutées à un système pour améliorer une tâche particulière, une action spécifique. Cette façon de penser, en construisant d'abord le système physique puis en ajoutant le Jumeau, réduit les possibilités d'utilisation des Jumeaux Numériques et complique parfois leur mise en œuvre (capteurs, conception, etc.). Cela nous permet d'inférer que les acteurs industriels ont encore besoin d'une meilleure compréhension du concept lui-même et du processus d'implémentation pour tirer le maximum de bénéfice de l'implémentation des Jumeaux Numériques et permettre de placer le Jumeau Numérique au sein d'une dynamique collaborative, que ce soit en phase de conception ou de fabrication. Il est nécessaire de changer la façon dont les systèmes et leurs Jumeaux Numériques sont construits, en pensant à leur conception ensemble pour maximiser leur potentiel. Dans ce contexte, une recommandation est faite pour des recherches plus approfondies sur l'utilisation d'un "Digital Thread" (Singh and Willcoxy, 2018; Madni, Madni and Lucero, 2019) du produit et son implémentation dès le début (phase de conception) jusqu'à la fin (phase de mise au rebut) du cycle de vie du produit.

Pour permettre l'implémentation d'un Jumeau Numérique comme un outil participant à la collaboration au sein de la phase de fabrication d'un produit, il paraît donc nécessaire de déterminer une manière pour le Jumeau d'observer le produit directement en temps réel, pour être une représentation en temps-réel du produit physique en phase de fabrication.

Synthèse : usage du Jumeau Numérique pour les pratiques collaboratives en fabrication

- Le Jumeau Numérique facilite la collaboration pendant la phase de fabrication en permettant un suivi en temps réel des systèmes de production grâce à l'intégration de capteurs et de données dans un modèle virtuel. Cela aide à détecter des anomalies, à prendre des mesures correctives rapides, et permet aux équipes de suivre et d'ajuster les processus de fabrication en temps réel.
- Cependant, il existe des défis dans son utilisation pour la collaboration. L'intégration des données de différentes sources peut être complexe, et la synchronisation en temps réel des données peut poser des problèmes de latence. De plus, le Jumeau Numérique se concentre souvent sur la machine plutôt que sur le produit lui-même.

- Pour tirer le meilleur parti du Jumeau Numérique en phase de fabrication, il est important de pouvoir observer directement le produit en temps réel. Cela rendrait le Jumeau plus précis et plus efficace pour soutenir la collaboration dans la fabrication.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de définir plus explicitement ce qu'est un Jumeau Numérique, ou plutôt ce que sont les Jumeaux Numériques. Une analyse de la littérature a permis d'identifier les capacités du Jumeau Numérique en temps qu'artéfact pour favoriser la collaboration dans le cadre de la conception et de la fabrication.

Néanmoins, il apparaît plusieurs limites pour faire du Jumeau Numérique un outil permettant aux acteurs d'observer et d'interagir avec le produit lors de la fabrication, comme cela a pu être le cas dans toute la première partie du processus de co-conception. Il faut donc repenser la manière actuelle d'implémenter un Jumeau Numérique pour le suivi d'un produit pendant sa fabrication : il est nécessaire de recueillir des données issues du produit lui-même, en temps réel, afin de permettre à chaque acteur de communiquer efficacement avec celui-ci.

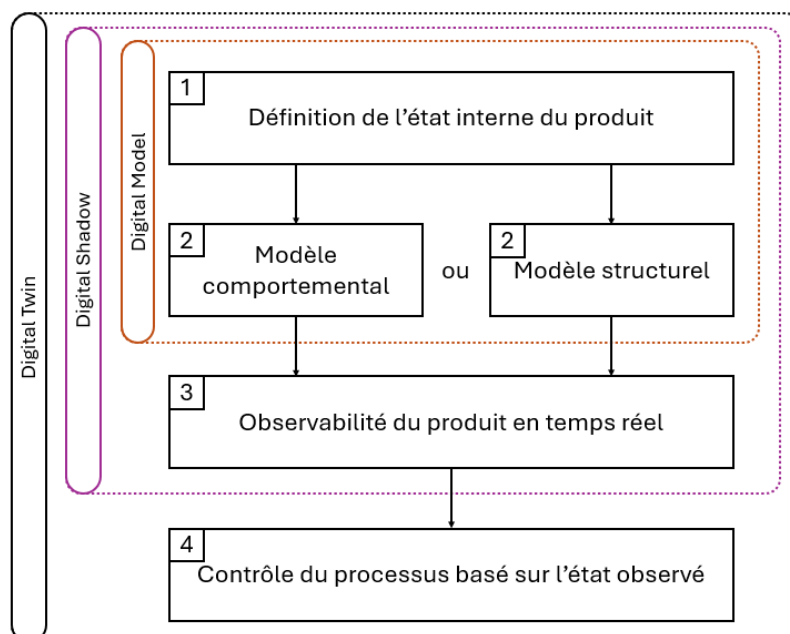
Cette notion d'observabilité du produit, qui sera définie de manière plus détaillée dans le chapitre suivant, est également nécessaire afin de vérifier que le produit vérifie bien, durant toute la phase de fabrication, les exigences établies pour celui-ci durant la phase de conception. Ainsi, cette observabilité doit permettre un contrôle de la chaîne de fabrication par le produit (i.e. son état réel et ses exigences).

Les prochains chapitres porteront ainsi sur l'élaboration et l'application d'une méthode pour implémenter ce Jumeau Numérique du produit en phase de fabrication, afin de passer d'une démarche d'open-manufacturing à une véritable démarche de fabrication collaborative à travers l'implémentation du paradigme du Système Contrôlé par le Produit.

CHAPITRE 3.

APPROCHES D'OBSERVABILITE DU FLUX CIRCULANT DE PRODUIT ET SYSTEME CONTROLE PAR LE PRODUIT

Notre démarche de conception d'un Jumeau Numérique pour le paradigme du SCP



3.1 Introduction du chapitre 3

Aujourd'hui, le concept d'intelligence du produit émerge à notre sens comme un pilier fondamental pour le domaine de l'innovation et en particulier pour le projet INEDIT.

Product Intelligence : (McFarlane et al., 2013)

“In an industrial context, the notion of product intelligence describes the linking of a physical order or product to information and rules governing the way it is intended to be made, stored or transported.”

“Thus, an approach that follows the product intelligence paradigm for industrial control can be described as one that has the ability to treat each individual product instance differently depending on its specific characteristics and needs.”

“In a product intelligence approach, each part/product/ order is capable of collecting and storing information about its special requirements which can be unique for each instance.”

Dès 2002, (Wong *et al.*, 2002; McFarlane, 2003) fondent et réalisent cette intelligence en embarquant une technologie d'identification automatique dans un produit, pour permettre son observabilité directe lui conférant une certaine dynamique de contrôle de son procédé de production en complément de son observabilité indirecte par l'instrumentation de ce dernier.

Par la suite, l'évolution des technologies de l'information a contribué à renforcer le lien logico-physique d'un produit (Baïna, Panetto and Morel, 2009; Wuest *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2020) pour former un « objet » autonome et indépendant (Castro Espíritu, Mayer and Lhoste, 2008), lui conférant une certaine intelligence « technologique » pour lui permettre de jouer un rôle central de « contrôleur » de son propre système de production sous forme, entre autres :

- D'un « holon-produit » pour synchroniser des ressources de production en adoptant un style architectural holonique (Van Brussel *et al.*, 1998; Verstraete *et al.*, 2006);
- D'un « synchronisateur Business-To-Manufacturing » pour faire interopérer des systèmes d'entreprise autour d'un produit « bien & service » (Morel *et al.*, 2009);
- D'agents distribués et coopératifs pour auto-améliorer l'efficacité du système de production et de fait la qualité du produit tout en réduisant les rebuts (Leitão, Colombo and Karnouskos, 2016).

Dans (Morel, Pereira and Nof, 2019), les auteurs montrent que ce paradigme du « système contrôlé par le produit » a suscité et continue de susciter un intérêt certain dans de nombreux domaines

académiques et industriels pour revisiter la manière de concevoir et d'exécuter le contrôle d'un système de production afin d'améliorer son efficacité et sa réactivité pour mieux satisfaire les exigences des utilisateurs en matière d'individualisation et de qualité d'un produit (Castro Espíritu, Mayer and Lhoste, 2008). C'est dans cette dynamique engendrée par le produit intelligent que nous y avons vu son intérêt pour le travail collaboratif « Do-It-Together » développé par le projet INEDIT et pour son application à la conception et à la fabrication d'un produit répondant à des exigences d'individualisation et de qualité. En particulier, nous avons exploré les opportunités offertes par le concept de produit intelligent et du paradigme du SCP pour augmenter les capacités d'un procédé de fabrication additive, de façon à concevoir et fabriquer un produit améliorant ses propriétés d'individualisation et contrôlant sa qualité en matière de résistance mécanique.

Ainsi, ce chapitre vise à établir une démarche méthodologique pour intégrer les principes de produit intelligent, d'observabilité du système et de système contrôlé par le produit dans le processus de fabrication par impression 3D. En combinant théorie et pratique, cette thèse s'efforce de contribuer à l'avancement de la fabrication additive vers des systèmes de production intelligents et adaptatifs.

3.2 Intelligence du produit et produits intelligents

L'origine du terme « Intelligent Products » provient du domaine du service après-vente sous la forme de programme pouvant envoyer des requêtes de services et de maintenance. Cette technologie a rapidement été adoptée dans le contexte de l'industrie manufacturière et du contrôle de chaînes de production (Meyer, Främling and Holmström, 2009) et continue d'évoluer (Valckenaers, 2020). Le terme « produit intelligent » englobe désormais un large éventail d'artefacts et de dispositifs en constante évolution (Zhou *et al.*, 2018) qui intègrent des fonctionnalités avancées de traitement de l'information pour améliorer leurs performances et leur utilité.

Dans cette section, nous examinons les définitions, caractéristiques et terminologies liées à la notion d'intelligence des produits. Plus précisément, cette section cherche à répondre à diverses questions concernant le concept d'intelligence des produits, telles que la définition d'un produit intelligent, les liens entre différentes définitions de l'intelligence du produit, et l'approche de l'intelligence des produits dans le domaine du contrôle industriel. L'objectif est ensuite son application dans le contexte de la production d'une pièce par fabrication additive.

3.2.1 Produits Intelligents : concepts

Dans la littérature, un produit intelligent peut être défini sous plusieurs angles.

Intelligent Product : (McFarlane *et al.*, 2013)

“ A physical order or product instance that is linked to information and rules governing the way it is intended to be made, stored or transported that enables the product to support or influence these operations.”

McFarlane présente un produit intelligent comme une entité capable de collecter des données provenant de son environnement, de les analyser pour en extraire des informations pertinentes, et éventuellement d'agir en fonction de ces informations. Cette capacité d'autonomie cognitive confère aux produits intelligents une valeur ajoutée significative, les rendant plus efficaces, adaptatifs et interactifs.

Cette définition est une formulation descriptive de ce qu'est un produit intelligent. Plusieurs auteurs (Wong *et al.*, 2002; Kärkkäinen *et al.*, 2003; Meyer, Främling and Holmström, 2009) ont décrit l'intelligence des produits en termes de fonctionnalités qu'elle pourrait afficher essentiellement ou facultativement. Par exemple, un produit intelligent peut être défini d'après (Wong *et al.*, 2002) comme un produit qui :

- 1) Possède une identification unique ;
- 2) Est capable de communiquer efficacement avec son environnement ;
- 3) Peut conserver ou stocker des données à propos de lui-même ;
- 4) Utilise un langage pour afficher ses caractéristiques, ses exigences de production, etc. ;
- 5) Est capable de participer à ou de prendre des décisions pertinentes pour son propre destin.

Ainsi, les produits intelligents sont dotés de capteurs, de puces électroniques et de capacités de communication, leur permettant de collecter, d'analyser et d'échanger des données avec les systèmes environnants, afin d'alerter ou d'agir sur leur état. Une représentation d'un tel produit intelligent, issu des travaux de (McFarlane *et al.*, 2003), est présenté Figure 12.

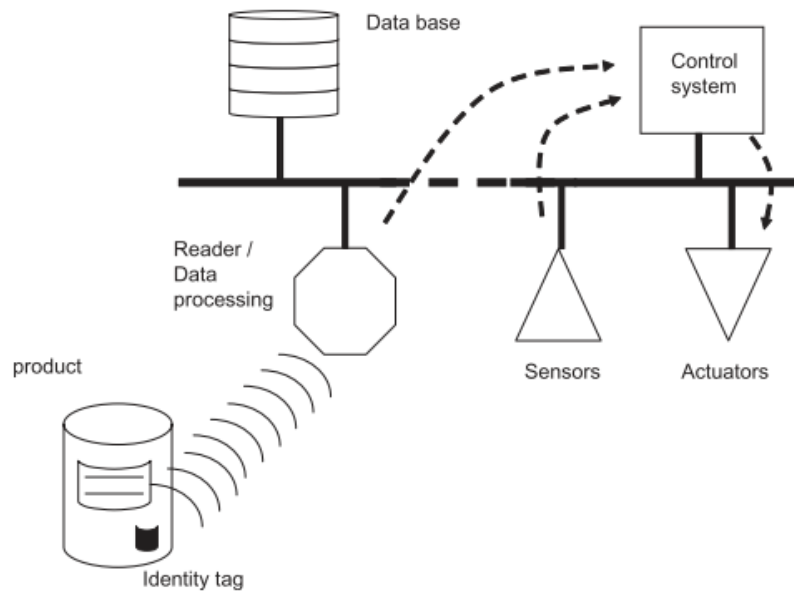


Figure 12 : Représentation schématique d'un système Auto ID, d'après (McFarlane et al., 2003)

Ce travail de thèse vise à améliorer un processus de fabrication additive en intégrant des produits intelligents. Ces dispositifs dotés de capteurs et d'actuateurs vont permettre une surveillance en temps réel du processus, améliorant la qualité des pièces produites permettant de vérifier le respect des exigences établies pour ces pièces. Cette approche transforme les processus traditionnels en systèmes réactifs et autonomes, ouvrant la voie à une fabrication plus efficace et personnalisée.

3.2.2 Intelligences du produit : concepts

Une distinction est cependant faite dans la littérature, séparant l'intelligence des produits en 2 niveaux d'application :

Product Intelligence : (Wong et al., 2002)

“Level 1 Product Intelligence: which allows a product to communicate its status (form, composition, location, key features), i.e. it is information-oriented.

Level 2 Product Intelligence: which allows a product to assess and influence its function (e.g. self-distributing inventory and self-manufacturing inventory) in addition to communicating its status, i.e. it is decision-oriented.”

Ainsi, les niveaux 1 et 2 distinguent entre la gestion passive de l'information (niveau 1), le produit se contentant de communiquer son état, et une implication plus active d'un produit intelligent dans les décisions associées à ses opérations (niveau 2).

En confrontant cette définition de l'intelligence du produit avec les cinq fonctionnalités énoncées précédemment, on voit que ces deux entités répondent aux quatre premières exigences d'un produit intelligent, mais seul le niveau 2, le produit intelligent « actif », répond à la cinquième exigence, à savoir agir sur sa réalité physique en fonction de son état.

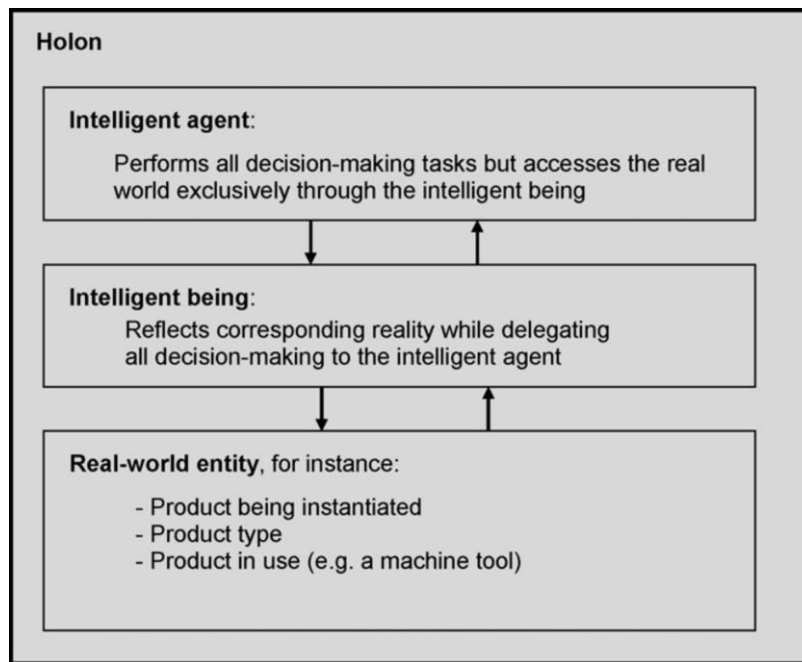
Un parallèle apparaît assez clairement entre ces produits intelligents « passifs » et « actifs » et les Digital Shadow et Digital Twin respectivement, tels qu'ils ont été présentés dans le chapitre précédent.

En effet, ces deux entités répondent aux quatre premières exigences d'un produit intelligent définies par (Wong *et al.*, 2002) et énoncées à la sous-section précédente. Mais seul le Digital Twin se comporte comme un produit intelligent « actif ».

Ce parallèle sera développé dans les prochaines sections de ce chapitre, justifiant de l'usage du Digital Twin ou du Digital Shadow selon l'application envisagée.

3.2.3 Intelligent beings : concepts

Valckenaers (Valckenaers *et al.*, 2009) va plus loin dans l'analyse des objets intelligents, en décomposant celui-ci en un ensemble d'holons séparés en deux sous-systèmes distincts (en plus de l'objet au sens physique) : un « intelligent being » et un « intelligent agent ». L'« intelligent being » est chargé des fonctions de réflexion de la réalité et des services d'information, tandis que l'« intelligent agent » prend les décisions et interagit avec le monde réel. Cette séparation permet une spécialisation et une stabilité accrues, rendant l'objet intelligent plus robuste et intégrable dans divers systèmes.



Ainsi, un « intelligent being » (*entité intelligente*) est décrit comme une sous-composante d'un produit intelligent, conçu pour refléter la réalité du produit sans nécessiter de prise de décision. Il est essentiellement un fournisseur d'informations et de services basés sur la réalité du produit physique et ses propriétés. Il fonctionne en parallèle avec un « intelligent agent », qui est responsable de la prise de décision et de l'interaction avec le monde réel.

Les fonctionnalités incluent plusieurs services sans prise de décision, tels que :

- **Modèles statiques et dynamiques :** Fournit des informations sur les propriétés techniques du produit ainsi que sur son évolution possible au fil du temps.
- **Émulation :** Permet de simuler des scénarios réels pour vérifier des plans avec une haute fidélité.
- **Accès au monde physique :** Traite les données brutes des capteurs pour fournir des informations utiles et encapsule les actions brutes pour qu'elles soient exploitables.
- **Traçabilité :** Assure le suivi et la traçabilité de l'état du produit et de son parcours.
- **Prévisions :** Fournit des prévisions à court terme basées sur les intentions et engagements connus des agents.

Un « Intelligent agent » (*agent intelligent*) est responsable de la prise de décision. Il s'agit d'un système autonome qui peut observer son environnement, interpréter ces observations, et agir de manière à atteindre des objectifs spécifiques. Les agents intelligents sont essentiels pour fournir des capacités décisionnelles qui ne sont pas couvertes par la réalité représentée par l'« intelligent being ». En

d'autres termes, l'« intelligent agent » prend des décisions basées sur les informations et les modèles fournis par l'« intelligent being », mais il est autonome dans son processus décisionnel.

Encore une fois, on peut aisément retrouver un parallèle entre notre classification des Jumeaux Numériques et cette décomposition du produit intelligent :

- Un Digital Shadow n'est composé que d'un « intelligent being », c'est-à-dire qu'il peut refléter la réalité du produit mais ne peut pas agir à partir de cette réalité.
- Un Digital Twin est composé des deux sous-systèmes, et est donc capable d'agir sur la réalité représentée par l'« intelligent being ».

En résumé, les agents intelligents et les objets intelligents constituent la base technologique sur laquelle reposent les Jumeaux Numériques. Les produits intelligents (équipés d'agents) peuvent prendre des décisions basées sur leur propre état et les conditions environnantes, s'alignant ainsi avec le concept de Jumeaux Numériques qui utilisent des représentations virtuelles pour améliorer la prise de décision et l'efficacité opérationnelle.

Nous allons voir dans la suite de ce chapitre comment les produits intelligents peuvent être utilisés notamment pour contrôler leur environnement en fonction de leur état. Nous allons étudier comment l'emploi du Jumeau Numérique peut permettre en ce sens une amélioration des paradigmes existants, comme le Système Contrôlé par le Produit, vers une application en temps réel.

3.2.4 Applications des produits intelligents

De nouveaux concepts ont été développés dans le cadre de la mise en œuvre de ces produits intelligents. L'Internet des Objets (IoT) est un concept émergent qui implique un réseau interconnecté d'objets physiques et d'appareils électroniques dotés de capteurs, de logiciels et de capacités de communication. Ces éléments permettent la collecte, la transmission et l'échange de données au sein d'un environnement numérique étendu (González García *et al.*, 2017). L'objectif principal est de permettre aux objets de détecter, de réagir et de collaborer de manière autonome. Les applications de l'IoT sont nombreuses et touchent divers domaines tels que la surveillance environnementale, la santé connectée, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et la maintenance prédictive, offrant ainsi des opportunités pour améliorer l'efficacité opérationnelle, la prise de décision basée sur les données et l'interaction homme-machine (Zhong *et al.*, 2017).

Pour appliquer l'IoT, plusieurs outils sont utilisés pour l'acquisition de données, notamment la technologie RFID (Radio Frequency Identification), ou les Wireless Sensor Networks, couplés à

l'utilisation de protocoles de communication standardisés et des plates-formes logicielles pour créer un écosystème interopérable et évolutif (Landaluce *et al.*, 2020).

Les puces RFID, par exemple, sont déployées pour instaurer un suivi efficace et automatisé des éléments constitutifs de la chaîne de production, des matières premières aux produits finis (Huang, Zhang and Jiang, 2007; Huang *et al.*, 2008). Cette technologie permet une communication entre les étiquettes RFID et les lecteurs RFID, facilitant ainsi la traçabilité des produits tout au long du processus de production. Cela facilite la détection précoce d'éventuels problèmes, tels que des défauts de fabrication, des erreurs de traitement ou des retards inattendus. Ils contribuent également à la gestion efficace des stocks en offrant une visibilité accrue sur les niveaux de matières premières, de composants et de produits finis. Cette visibilité améliorée permet une prise de décision concernant la planification de la production et l'allocation des ressources (Visich *et al.*, 2009), et permet une meilleure gestion de la production de produits personnalisés dans un contexte de mass-customization (Zhong *et al.*, 2013; Chuang, Guanghui and Junsheng, 2021).

Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks) sont des systèmes autonomes de capteurs interconnectés qui communiquent sans fil pour collecter et transmettre des données sur leur environnement. Leur utilisation est répandue dans divers domaines, notamment dans l'industrie mais également la surveillance environnementale, l'agriculture intelligente, la santé, la gestion des infrastructures, et la sécurité. Ces réseaux permettent de surveiller en temps réel différents paramètres, d'automatiser des processus, d'optimiser les ressources et d'améliorer la prise de décision. Dans l'industrie manufacturière, on retrouve ces réseaux dans le cadre du Wireless Manufacturing (Huang, Wright and Newman, 2009) et du Cloud Manufacturing (Wu *et al.*, 2015; Zhong *et al.*, 2017; Tao, Qi, *et al.*, 2018), qui font plus largement référence à l'utilisation de technologies de communication sans fil telles que le Wi-Fi, le Bluetooth, ou d'autres protocoles (Meyer, Främling and Holmström, 2009) pour connecter et coordonner les machines, les équipements et les systèmes de fabrication.

En intégrant ces concepts dans le cadre du contrôle d'un système de production par des produits intelligents, on explore comment les produits interagissent et influencent les systèmes de fabrication et d'utilisation, contribuant ainsi à créer des environnements de fabrication plus agiles, adaptatifs et efficaces (Penas *et al.*, 2017). Cette transition souligne le potentiel et les implications de l'intégration des produits intelligents pour le paradigme du système contrôlé par le produit.

Après avoir examiné en détail les concepts de l'intelligence du produit et des produits intelligents dans la première partie, nous nous tournons désormais vers l'intégration de ces notions dans le cadre plus

large du contrôle d'un système de production par ce produit intelligent. Alors que la première partie de ce chapitre nous a permis de comprendre les caractéristiques et les capacités des produits intelligents en tant qu'entités autonomes dotées d'intelligence intégrée, la seconde partie explore comment ces produits interagissent et influencent les systèmes de fabrication et d'utilisation. Nous examinerons comment les produits intelligents deviennent des acteurs actifs dans leur propre processus de production, contribuant ainsi à créer des environnements de fabrication plus agiles, adaptatifs et efficaces. En mettant en lumière cette transition, nous nous engageons à explorer plus en profondeur le potentiel et les implications de l'intégration des produits intelligents pour le paradigme du système contrôlé par le produit.

Ce qu'il faut retenir des produits intelligents

- Les produits intelligents sont des produits dotés de capacités avancées pour collecter, analyser et agir sur les données de leur environnement. Ils peuvent améliorer leur performance et leur utilité en fonction des informations qu'ils reçoivent. Ces produits existent à différents niveaux d'intelligence, allant de simples communications sur leur état à la capacité d'influencer leurs propres opérations.
- Ils sont largement utilisés dans divers domaines, notamment dans l'Internet des Objets (IoT), où ils surveillent l'environnement, la santé, la chaîne d'approvisionnement, et la maintenance. Pour collecter des données, ces produits utilisent des technologies comme les puces RFID et les réseaux de capteurs sans fil.
- En intégrant ces technologies, nous pouvons créer des environnements de fabrication plus agiles et efficaces, où les produits jouent un rôle actif dans leur propre processus de production. Cela ouvre la voie à une nouvelle ère de fabrication intelligente et interconnectée.

3.3 Produit intelligent et système contrôlé par le produit

Le paradigme traditionnel de la fabrication industrielle repose souvent sur des systèmes contrôlés de manière centralisée, où les processus de production sont étroitement surveillés et régulés par des opérateurs humains ou des systèmes automatisés. Cependant, avec l'avènement des produits intelligents, dotés de capteurs, d'actuateurs et de capacités de traitement des données, un changement de paradigme est en cours. Ces produits intelligents deviennent des acteurs actifs dans leur propre processus de production, interagissant avec leur environnement et prenant des décisions autonomes pour optimiser leur performance.

Dans ce contexte, le paradigme du Système Contrôlé par le Produit (SCP) apparaît comme un outil permettant d'assurer le bon fonctionnement d'un processus de production d'un produit. En permettant la surveillance des différentes variables et paramètres liés au produit et à son processus de fabrication, il offre une visibilité accrue sur l'état du système et permet de détecter rapidement les déviations par rapport aux normes préétablies. Cela permet non seulement d'assurer la qualité et la fiabilité des produits, mais aussi d'identifier des opportunités d'optimisation et d'amélioration continue des processus.

Pourtant, ce paradigme possède également des limites inhérentes liées à son application uniquement en temps discret dans la littérature, et à une observabilité directe des produits reste assez peu étudiée dans le contexte des produits intelligents. Dans cette partie, nous explorons la notion d'observabilité du produit et son rôle dans le paradigme émergent du Système Contrôlé par le Produit.

3.3.1 Application des produits intelligents au contrôle et paradigme du Système Contrôlé par le Produit

L'implémentation des « Produits intelligents », et notamment des technologies de suivi du produit comme la technologie RFID vue précédemment, sont depuis près de deux décennies un pilier du secteur industriel. Ils permettent une observation discrète de l'état d'un produit sur une chaîne de production.

Avant leur implémentation, l'évaluation de l'identité et de la localisation de produits spécifiques au sein de la chaîne de fabrication était typiquement réalisée de manière indirecte. Le processus d'identification englobait généralement une inspection manuelle ou le recours à la lecture de codes-barres, souvent également effectuée manuellement. La localisation des produits était ensuite dérivée

à partir de données de proximité locale couplées à des modèles de suivi informatisés appropriés qui associaient ces données avec le point d'identification le plus récent.

Les limitations inhérentes à l'application de tels systèmes pour la traçabilité individuelle des produits au cours de leur cycle de vie sont d'une part l'accumulation d'inexactitudes associées à l'identification du produit et de son état, ainsi que la complexité des processus d'identification, rendant ardue l'automatisation complète dans des délais appropriés. Typiquement, les procédés d'identification se limitaient à déterminer le type de produit, sans en réalité établir l'identité unique de l'instance du produit en question. Ainsi, plusieurs avantages spécifiques découlent des applications de la technologie RFID au sein de la chaîne de production manufacturière.

Dans ce contexte, McFarlane propose un paradigme du « Système Contrôlé par le Produit », ou plus précisément un « Auto-ID-based control system ».

Auto-ID-based control system : (McFarlane et al., 2003)

“ When deployed in conjunction with a feedback control system, the introduction of Auto ID data provides the possibility of information relating to a product—identity, instructions, history—being used in conjunction with typical operational data—temperature, position, velocity, equipment status to set control actions. The combination of these two data forms can clearly enhance the decision and actuation processes in the control loop.”

Ce paradigme est basé sur l'ajout d'informations issues du produit dans le contrôle de la production. Sans l'utilisation du système contrôlé par le produit, on contrôle un processus de manière classique comme présenté à la Figure 13.

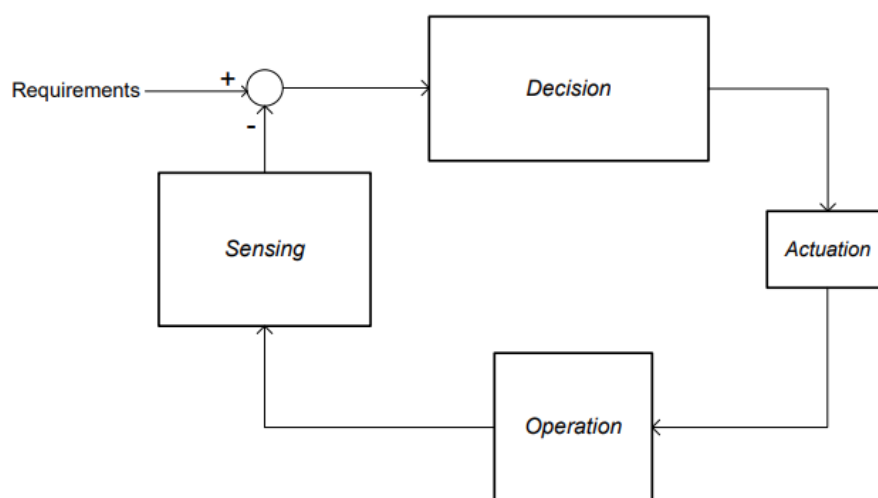


Figure 13 : Contrôle classique d'un processus de production, d'après (McFarlane et al., 2013)

Après l'emploi du Jumeau Numérique dans le cadre du paradigme du système contrôlé par le produit, le processus de production peut être présenté comme à la Figure 14.

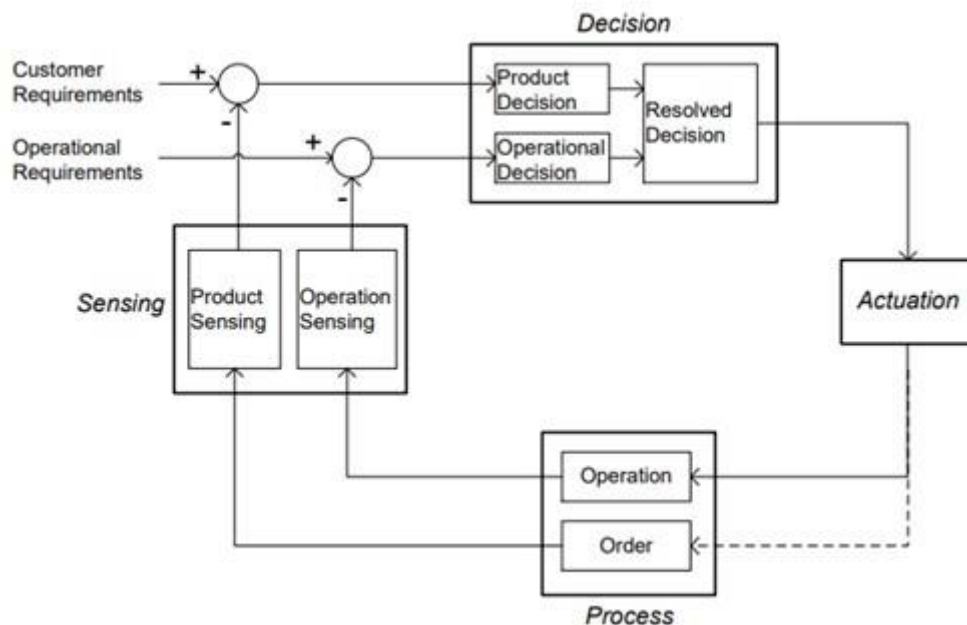


Figure 14 : Application du Jumeau Numérique du produit au paradigme du système contrôlé par le produit, pour le contrôle d'un système de production, d'après (McFarlane et al., 2013)

Le SCP implique la capture automatisée et en temps discret de l'identité et d'informations sur l'état d'un produit. Lorsqu'elles sont combinées avec des informations issues de la chaîne de production, ces données permettent de prendre des mesures ciblées directement pertinentes pour l'élément identifié. L'un des avantages du SCP est sa capacité à améliorer la flexibilité et l'agilité des processus de fabrication. Il offre des possibilités d'optimisation des performances et d'amélioration continue : les produits intelligents peuvent surveiller en permanence leur propre fonctionnement, identifier les inefficacités et les opportunités d'optimisation, et ajuster leurs actions en conséquence.

La littérature a exploré les applications pratiques du système contrôlé par le produit dans divers domaines industriels, tels que la fabrication, l'automatisation industrielle et la gestion de la chaîne d'approvisionnement (McFarlane et al., 2003; Huang, Wright and Newman, 2009). Des études de cas ont montré comment ce paradigme peut être utilisé pour améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les coûts de production et permettre une fabrication plus flexible et personnalisée (Huang, Zhang and Jiang, 2008).

Le SCP permet de faire du produit l'orchestrateur de sa production, subordonné aux besoins des utilisateurs. Pour cette raison, nous avons décidé de l'employer dans le cadre de ce travail de thèse comme un moyen d'ancrer une ingénierie collaborative sur la réalité physique du produit.

Mais qui dit réalité physique dit observer l'état physique du produit. Il est donc nécessaire de se questionner sur ce dont le produit a besoin comme informations afin de décrire son état physique tout au long de sa production.

3.3.2 Observabilité d'un produit

L'observabilité est un concept en théorie des systèmes (Kalman, 1959) et en ingénierie qui fait référence à la capacité de comprendre l'état interne d'un système en examinant ses sorties ou son comportement. Dans les systèmes complexes, notamment ceux impliquant des logiciels, des réseaux ou des systèmes distribués, l'observabilité est cruciale pour la surveillance, le débogage et le dépannage.

Observability : (Kalman, 1959)

"A costate z^* of a plant is said to be "observable" if its exact value $[z^*, x]$ at any state x at time 0 can be determined from measurement of the output signal $y_1(t) = [b^*, \Phi(t; x, 0)]$ over the finite interval $0 \geq t \geq t_2$. The time t_2 will depend in general on z^* . If every costate is observable, we say that the plant is "completely observable".

Observability : (Liu, Slotine and Barabási, 2013)

"A system is called observable if we can reconstruct the system's complete internal state from its output".

"The internal variables of a complex system are rarely independent of each other, as the interactions between the system's components induce systematic interdependencies between them. Hence, a well-selected subset of variables can contain sufficient information about the rest of the variables, allowing us to reconstruct the system's complete internal state, making the system observable."

Un système peut donc être considéré comme observable si l'on peut, en observant un certain nombre de paramètres judicieusement choisis, reconstruire l'état interne complet de celui-ci à chaque instant. L'observabilité joue un rôle essentiel dans la compréhension du fonctionnement des systèmes complexes, facilitant une surveillance, un débogage et un dépannage efficaces.

L'observabilité des produits intelligents est un élément clé pour exploiter pleinement leur potentiel en tant qu'acteurs autonomes et adaptables dans les systèmes de fabrication et d'utilisation. Elle permet une gestion proactive, une maintenance préventive et une amélioration continue des produits, contribuant ainsi à accroître leur valeur et leur impact dans divers domaines d'application.

Néanmoins, cette notion n'apparaît que peu dans les définitions des produits intelligents présentées à la section précédente. Elles mentionnent généralement une capacité des produits intelligents à communiquer sur leur état mais pas comment les informations sur son état sont obtenues, et il revient donc de se questionner sur la connaissance du produit vis-à-vis de son état.

3.3.3 Limites de l'observabilité du produit pour le paradigme du Système contrôlé par le Produit

Il est important de noter que dans le cadre de son paradigme du SCP, McFarlane s'intéresse au contrôle d'un système en particulier : la chaîne de production. En effet, comme cela a pu être étudié dans la suite de ses travaux, l'utilisation des données issues du produit permet, à certains instants discrets de la chaîne de production, de prendre des décisions personnalisées sur la fabrication du produit, basées sur ses informations individuelles (McFarlane *et al.*, 2013; McFarlane, Giannikas and Lu, 2016; Srinivasan *et al.*, 2018).

Néanmoins, une chaîne de production peut être décomposée en un ensemble de sous-systèmes individuels, comportant notamment les différentes machines de mise en forme d'un produit (fabrication, assemblage, ...). Au sein de ces différents systèmes individuels, McFarlane n'applique pas le paradigme du SCP, puisque le produit ne communique avec son environnement de production qu'entre chaque étape de sa production. Chaque machine est donc contrôlée uniquement de manière classique, par une boucle de contrôle asservissant ses actionneurs, afin de réaliser une série de commandes définies à l'avance.

Ainsi, le paradigme du SCP tel que décrit par McFarlane présente une limitation non négligeable : il repose sur un fonctionnement en temps discret, ce qui signifie que les interactions entre le produit et son environnement sont souvent limitées à des intervalles de temps prédéterminés. Cette limitation peut entraîner une perte de contexte et de granularité dans la surveillance et la prise de décision, car les informations sur l'état du produit ne sont pas disponibles en continu.

De ce fait, aucune observation, aucune donnée issue directement du produit n'est utilisée dans un objectif de contrôle du processus de fabrication. En effet, à chaque étape de sa chaîne de production, le produit est dans un certain état théorique, et communique à la prochaine machine cet état ainsi que l'état final qu'il doit avoir à la sortie de la machine. A partir de ces informations, la machine réalise les opérations nécessaires pour passer le produit de cet état initial à cet état final. Mais aucune vérification n'est faite sur le fait que le produit soit bien conforme à son état initial théorique à l'entrée dans la machine, ni qu'il ressort bien dans son état final demandé. Ainsi, si à n'importe quelle étape de sa

chaîne de production, il apparaît une différence entre l'état théorique et l'état réel du produit, elle ne sera pas détectée, et encore moins corrigée, avant qu'un opérateur extérieur ne la remarque.

Et même si des contrôles étaient mis en place entre certaines étapes de la chaîne de production, ils ne permettraient qu'une observabilité directe du produit limitée par un système fonctionnant en temps discret. Les capteurs observant le produit peuvent fournir des données sur son état à des intervalles réguliers, mais ils ne permettent pas une surveillance en temps réel pendant un processus de fabrication (i.e. dans une machine) ou une compréhension détaillée de son comportement dans des situations dynamiques et imprévues.

Cette absence d'observabilité en temps réel peut rendre difficile la détection précoce des anomalies ou des défaillances potentielles, ce qui peut compromettre la fiabilité et la sécurité du système dans son ensemble. Par conséquent, bien que le paradigme du système contrôlé par le produit offre des avantages indéniables, il est important de reconnaître ses limitations, en particulier en ce qui concerne la surveillance et la gestion des produits intelligents au sein d'un processus de fabrication. Pour surmonter ces limitations, il est nécessaire d'explorer des approches et des technologies qui permettent une observabilité plus directe et en temps réel des produits, tout en exploitant pleinement leur intelligence intégrée pour optimiser les performances du système dans son ensemble.

Un objectif de ce travail de recherche va ainsi consister à modifier l'implémentation du système contrôlé par le produit afin de pouvoir suivre le produit en temps réel à l'aide de l'emploi d'un Jumeau Numérique, par opposition au suivi en temps discret réalisé jusqu'ici dans la littérature.

Dans le cadre de notre application expérimentale, notre objectif est ainsi de suivre un produit fabriqué par une imprimante 3D, afin notamment de contrôler en temps réel certains de ses phénomènes physiques pour satisfaire ces exigences en termes de résistance mécanique.

Ce qu'il faut retenir du SCP

- Le concept de produit intelligent change la manière dont nous gérons les processus de fabrication. Traditionnellement, ces processus étaient contrôlés de manière centralisée par des humains ou des systèmes automatisés. Mais avec l'arrivée des produits intelligents, équipés de capteurs et de capacités de traitement des données, un nouveau paradigme émerge.

- Dans ce nouveau système, appelé *Système Contrôlé par le Produit*, les produits intelligents deviennent actifs dans leur propre production, interagissant avec leur environnement et prenant des décisions pour optimiser celle-ci. Ce paradigme de production permet une meilleure surveillance des processus de production et une détection rapide des problèmes.
- Mais ce système a ses défis en ce qui concerne l'observabilité des produits. Dans un système fonctionnant en temps discret, l'observation de l'état du produit est limitée, et le contrôle du process n'est lui aussi possible qu'en temps discret. Pour résoudre cela, nous explorons des technologies comme les Jumeaux Numériques pour permettre une observabilité des produits en temps réel.

3.4 Application du paradigme du système contrôlé par le produit au suivi d'un produit pendant le processus de production/fabrication : utilisation du Jumeau Numérique

La notion d'observabilité d'un système revêt une importance cruciale dans la gestion efficace des processus de fabrication. Elle est essentielle pour détecter les anomalies, prévenir les défaillances et optimiser les performances.

Nous abordons le paradigme émergent du SCP en temps réel en y intégrant ce concept d'observabilité. Dans ce modèle, le produit intelligent devient un acteur central dans la gestion de son propre processus de fabrication. Il agit comme un agent autonome, capable de surveiller son environnement, de prendre des décisions et d'adapter son comportement en fonction des objectifs définis.

Dans cette partie, nous nous proposons d'explorer une démarche d'application de ces concepts dans le domaine de la fabrication additive, plus précisément dans le processus d'impression 3D d'une pièce. Nous examinerons comment le Jumeau Numérique, en tant qu'outil d'observation et de modélisation d'un système ou produit, peut être utilisé pour créer une réplique numérique en temps réel du produit tout au long du processus de fabrication capable de contrôler celui-ci.

3.4.1 Méthodologie d'application du Jumeau Numérique pour l'observabilité du produit

Les parties précédentes de ce chapitre nous ont amené à plusieurs conclusions.

D'abord, le SCP apparaît comme capable de faire du produit l'orchestrateur de sa production, subordonné aux besoins des utilisateurs. Pour cette raison, nous avons décidé d'employer ce paradigme dans le cadre de cette thèse comme un moyen d'ancrer une ingénierie collaborative sur la réalité physique du produit.

Néanmoins, une question se pose quant à l'utilisation de ce paradigme dans le cas d'un système en temps réel. Dans ses applications du SCP, McFarlane ne traite pas de l'observabilité directe du produit, et réalise seulement un contrôle en temps discret par le produit, en se reposant sur l'identification RFID des produits pour connaître son état. Or rien ne garantit, sans vérification de la conformité de cette identification, que le produit est bien dans l'état qu'il communique au système de contrôle. Ainsi, il va être nécessaire d'intégrer un outil capable d'augmenter la capacité d'un produit contrôlant son système, afin de représenter fidèlement en temps réel son état physique.

Or, le chapitre précédent nous a permis de mettre en évidence une technologie qui remplit ce rôle : le Jumeau Numérique. En particulier, deux objets parmi la famille des Jumeaux Numériques répondent à ces contraintes, à savoir les Digital Shadows et Digital Twins. On a vu dans le début de ce chapitre qu'ils correspondaient respectivement à ce que l'on peut retrouver dans la littérature comme des produits intelligents passifs (niveau 1) et actifs (niveau 2). On va donc s'intéresser à l'application de ces deux formes de Jumeaux Numériques pour permettre l'observabilité d'un produit en temps réel pendant un processus de production, puis comment ces outils interviennent à différentes échelles du SCP.

Par définition, un produit possède un caractère d'observabilité si l'on peut déduire l'état interne complet de son système à partir d'un nombre fini de variables observées. Pour réaliser un Jumeau Numérique d'un produit pendant un processus de fabrication, il va être nécessaire de suivre un certain nombre d'étapes. Ces différentes étapes sont décrites sur la Figure 15.

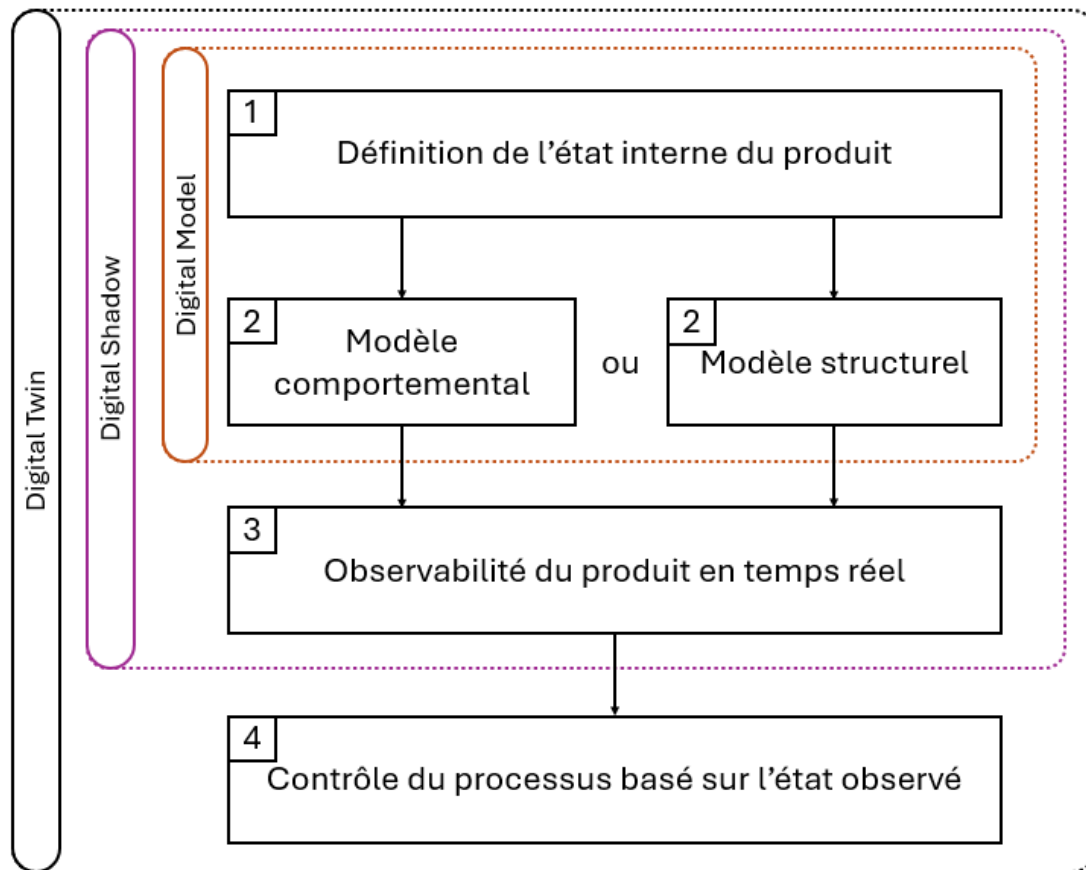


Figure 15 : Modèle de conception en oignon d'un Jumeau Numérique pour le paradigme du SCP

1. Définir les parties de l'état interne de notre produit qui sont pertinentes pour notre étude

En effet, un produit ou système est en général un objet complexe, composé d'éléments mécaniques, électriques et électroniques, logiciels, chimiques, etc. qui interagissent de manière multiphysique. Déterminer l'état interne complet de ce système peut demander des efforts d'observations très importants à implémenter, sans que cela ne soit forcément justifié. Il est donc important de corréliser la partie de l'état interne du produit que l'on souhaite rendre observable avec les critères imposés par le client, établis par les différents acteurs de la conception.

Pour notre application, nous avons fixé comme critère imposé la résistance mécanique du produit, et en particulier sa résistance mécanique inter-couche (*interlayer bonding*).

2. Déterminer l'ensemble des variables à observer permettant de déterminer chaque partie retenue de l'état interne du produit

Pour déterminer les variables à observer pour décrire l'état interne du produit, il va être nécessaire de modéliser cet état interne, c'est-à-dire de réaliser un modèle virtuel de l'objet physique.

Le noyau d'un Jumeau Numérique repose sur l'utilisation d'un modèle virtuel. Par conséquent, l'étape la plus importante pour construire un Jumeau Numérique consiste à créer des modèles virtuels qui reproduisent fidèlement la géométrie, les propriétés physiques, les comportements et les règles de l'objet physique.

Dans le cadre de notre application, cela a représenté un défi, car nous nous intéressons à l'observation d'un critère, la résistance mécanique du produit final, tout au long de la fabrication. Or ce critère ne peut être mesuré classiquement que par contrôle destructif, et uniquement une fois la phase de fabrication du produit achevée. Il a donc été nécessaire de déterminer des variables observables tout au long du process dont l'observation permettra de remonter à la résistance mécanique du produit final.

Pour créer ces modèles, deux méthodes d'abstraction sont possibles (Segovia and Garcia-Alfaro, 2022).

Les modèles comportementaux

Ce genre de modèle se base sur la collecte de données pour définir le comportement d'un système. Cette méthode implique de comprendre ces données et de les exprimer à travers des équations mathématiques. Dans les systèmes complexes, il peut être difficile voire impossible de comprendre complètement le processus physique, cette modélisation offre des outils pour analyser le comportement du système. En revanche, les modèles basés sur les données fonctionnent d'une manière plus opaque (« boîtes noires »). Malgré tout, ces approches sont plus souples et peuvent intégrer de nouvelles données expérimentales. Elles conviennent mieux aux systèmes complexes où comprendre la physique est difficile voire impossible, voire dans des situations où les modèles physiques ne sont pas applicables.

Ce type de modèle est utilisé dans un premier temps pour notre application. Il est basé sur des mesures expérimentales afin d'approcher, autour des conditions d'usage « classiques » de l'imprimante 3D, un modèle de la température d'extrusion du filament en fonction d'un certain nombre de paramètres de fabrication (Chapitre 4).

Les modèles structurels

Ce modèle décrit de manière organisée comment les différentes parties d'un système sont reliées et assemblées d'un point de vue phénoménologique et physique pour réaliser leurs fonctions et

comportements. Ces relations entre les parties sont essentielles pour transférer et transformer la matière, l'énergie, l'information et le mouvement dans le système. Le modèle structurel comprend généralement la définition de la disposition des composants et leur agencement.

Ce type de modèle sera implémenté dans un second temps, à l'aide d'outils de modélisation des phénomènes thermiques basés sur les méthodes de résolution de Monte-Carlo symbolique (Chapitre 6)

Une fois ces deux étapes effectuées, nous avons, si l'on se réfère à notre classification établie dans le chapitre précédent, créé le *Digital Model* de notre produit.

3. Implémenter une observation de ces variables en temps-réel

Une fois ce modèle établi, il est nécessaire d'observer, en temps réel, ces variables afin d'actualiser le modèle virtuel, et d'en déduire l'état du produit/système réel à chaque instant.

Cette observabilité du produit est dans la majorité des cas, réalisée à l'aide de capteurs (Barricelli, Casiraghi and Fogli, 2019), déjà existants au sein du processus de production ou rajoutés ad hoc (Sigl *et al.*, 2020).

Cette implémentation de capteurs pour observer l'état du produit pendant un processus de production n'est pas simple. En effet, durant ces processus, le produit se forme ou se transforme, et il peut être difficile mesurer certains paramètres pendant ce processus. Certaines formes d'observation de ces paramètres ne peuvent pas être appliquées pendant un processus de fabrication, comme les contrôles destructifs ou la métrologie, ce qui limite les paramètres mesurables.

Nous nous sommes servis dans le cadre de nos expérimentations d'une caméra thermique. L'observation de l'état de la pièce par cette caméra est détaillée dans le chapitre 4.

Une fois ces trois étapes achevées, une première forme de produit intelligent, rendant le produit observable en temps réel, est réalisé. Il ne s'agit néanmoins que d'un *Digital Shadow*, car il ne contrôle pas le processus de production.

Pour mettre en place le paradigme du SCP, il va donc être nécessaire de mettre en place une quatrième étape d'implémentation du Jumeau Numérique, basée sur la capacité de ce Jumeau à agir sur son homologue physique. En d'autres termes, il faut encore implémenter son « Intelligent agent ».

3.4.2 Usage du Jumeau Numérique comme outil pour le paradigme du système contrôlé par le produit

Cette sous-partie va s'intéresser à l'implémentation du paradigme du SCP en temps réel à l'aide du Jumeau Numérique. On va ici s'intéresser à la quatrième étape de notre méthodologie, à savoir l'ajout d'un organe de notre contrôle à notre Jumeau, basé sur l'observation du produit.

4. Implémenter un contrôle du processus basé sur l'état observé du système

Une fois l'état du produit entièrement déterminé, l'application du paradigme du système contrôlé par le produit va consister en l'implémentation d'une boucle de contrôle du processus de production, en comparant l'état réel du produit avec son état attendu, à chaque instant.

Pour implémenter ce contrôle, il va falloir effectuer la même démarche qu'au second point de cette méthodologie, mais cette fois pour l'interaction {processus-produit}, à savoir déterminer comment les différents paramètres du système de production influencent l'état interne du produit, par le biais de modèles structurels ou comportementaux.

Cette interaction sera, comme dans le cadre du second point, réalisée dans le cadre de notre étude expérimentale d'abord à partir d'un modèle comportemental (Chapitre 5), puis une discussion portera sur la possibilité de réaliser ce contrôle sans modéliser le système de production.

L'emploi de la technologie du Jumeau Numérique dans le cadre du système contrôlé par le produit apparaît comme un outil prometteur pour l'emploi du paradigme du SCP au sein d'un processus de production en temps réel, afin d'asservir la production d'un produit à sa réalité de fabrication et à ses exigences de conception.

Synthèse de notre apport

- Le concept de système contrôlé par le produit permet au produit lui-même de jouer un rôle actif dans sa production. Pour assurer une gestion efficace de ce système, il est nécessaire d'avoir une observabilité du produit en temps réel, c'est-à-dire la capacité à collecter des données pertinentes sur son état et son comportement.
- Nous explorons l'intégration de cette observabilité dans le cadre du paradigme du système contrôlé par le produit en utilisant le concept de Jumeau Numérique. Dans ce modèle, le Jumeau Numérique crée une réplique virtuelle en temps réel du produit pendant le processus de fabrication. Cette réplique permet de surveiller l'état du produit tout au long du processus.
- En ce sens, nous proposons une méthodologie pour l'implémentation d'un Jumeau Numérique pour le SCP en temps réel, que nous allons expérimenter dans la suite de ce travail de thèse.

L'application de cette méthode de construction d'un Jumeau Numérique pour permettre une observabilité directe, en temps réel du produit dans le cadre du paradigme du SCP, appliqué à un produit fabriqué par impression 3D, est illustrée sur la Figure 16, inspirée des modèles de (McFarlane *et al.*, 2013).

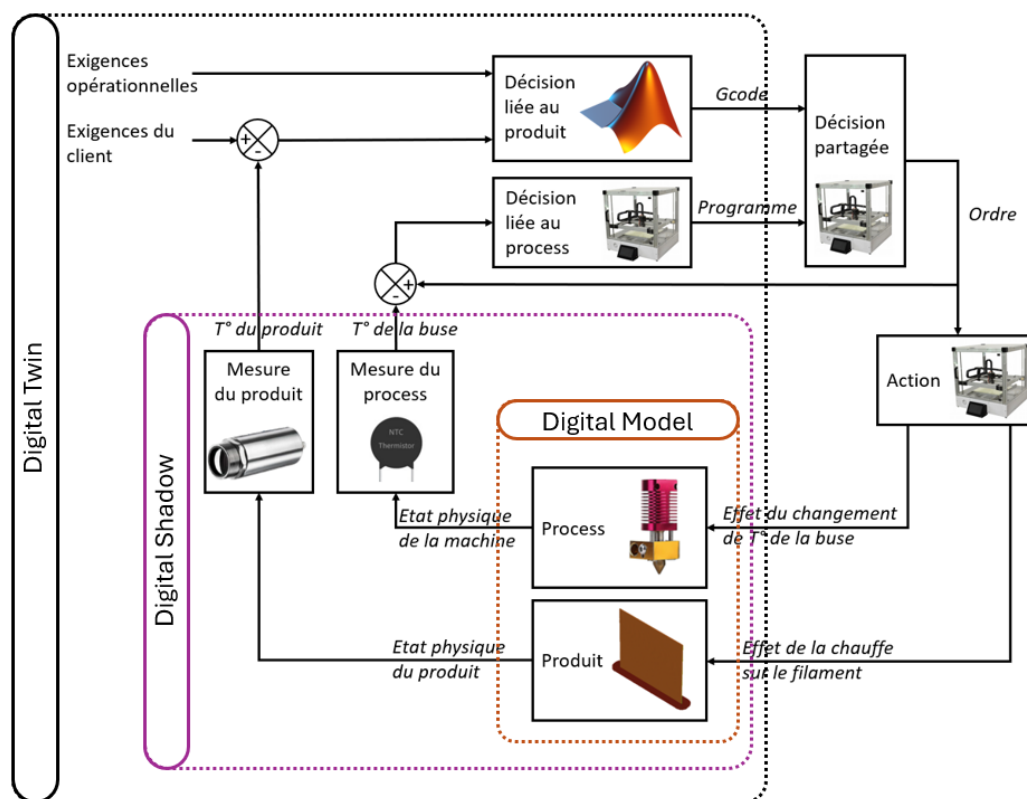


Figure 16 : Application d'un Jumeau Numérique au paradigme du système contrôlé par le produit en temps réel sur un processus de fabrication additive

3.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré en profondeur les différentes approches visant à accroître l'observabilité du flux circulant de produits et du système contrôlé par le produit. Nous avons d'abord examiné les concepts d'intelligence du produit et de produits intelligents, ainsi que leurs diverses applications dans différents domaines. Ensuite, nous avons étudié comment ces produits intelligents peuvent être intégrés dans le contrôle des systèmes, en mettant en évidence le paradigme du système contrôlé par le produit. Nous avons également analysé les défis liés à l'observabilité des produits et les limites de cette observabilité dans le contexte du système contrôlé par le produit. Enfin, nous avons exploré l'application concrète de ce paradigme au suivi des produits pendant le processus de production, en mettant en avant l'utilisation du Jumeau Numérique comme outil pour améliorer cette observabilité.

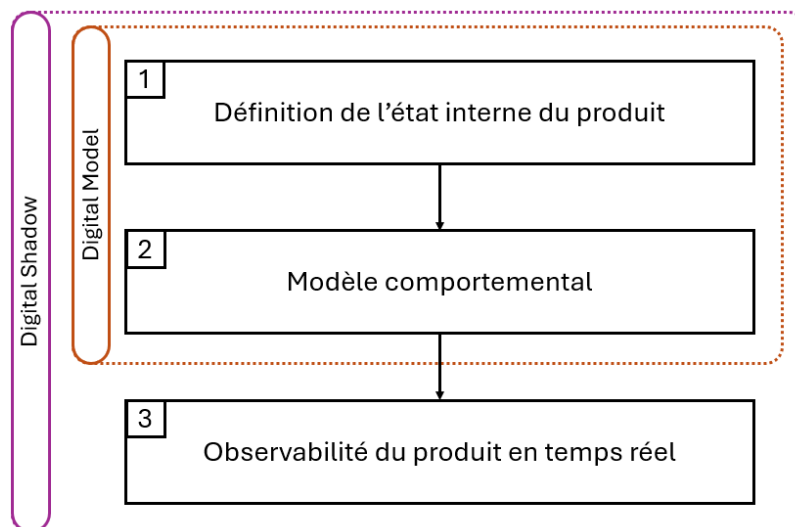
Ce chapitre souligne l'importance de l'observabilité dans la gestion efficace des flux de produits et dans l'amélioration des processus de production, tout en mettant en lumière le potentiel considérable du Jumeau Numérique pour transformer la manière dont nous surveillons et contrôlons les produits tout au long de leur cycle de vie.

Dans la suite de ce manuscrit, nous allons expérimenter la démarche détaillée dans la partie précédente, illustrée à la Figure 16, pour preuve de concept du SCP en temps réel pour contrôler au plus près des phénomènes physiques du produit. Cette application sera réalisée avec comme système de production une machine de fabrication additive FFF (Fused Filament Fabrication).

CHAPITRE 4.

D'UN PRODUIT A FAIRE...

*Notre démarche d'observabilité du produit en temps réel à travers
l'utilisation d'un Digital Shadow*



4.1 Introduction du chapitre 4

La fabrication additive par fusion de filament fondu (FFF) représente une avancée technologique majeure, permettant la production de pièces complexes avec une précision sans précédent. Cependant, pour atteindre une résistance mécanique optimale de ces pièces, il est essentiel de maîtriser l'évolution thermique en chaque point de la pièce au cours du processus d'impression. Cette maîtrise est cruciale car elle influence directement les propriétés finales du produit.

Le paradigme du Système Contrôlé par le Produit (SCP) propose une approche permettant d'atteindre cette maîtrise en commandant l'impression par le suivi au plus près de l'état du produit, ici représenté par sa résistance mécanique. Puisque cette résistance mécanique n'est pas observable tout au long du processus de fabrication, nous avons fait le choix de nous concentrer sur l'observabilité d'une information du produit liée à cet état, la température du filament extrudé. En exploitant un modèle dynamique du comportement thermique, il est possible de déterminer les paramètres de fabrication idéaux à chaque instant pour maintenir la température optimale de ce filament extrudé.

Ce chapitre explore les méthodes et les expérimentations nécessaires pour appliquer cette approche SCP à la fabrication additive. Il détaille l'utilisation d'un Jumeau Numérique pour surveiller et ajuster en temps réel les conditions de fabrication, avec un accent particulier sur l'observation directe de la température. L'objectif est de démontrer que cette technique permet de subordonner l'état final de la pièce aux exigences de conception, en garantissant une observabilité des phénomènes thermiques intervenant lors de l'extrusion et de la dépose du filament.

4.2 Expérimentation – Etude d'un processus de fabrication additive

Cette section a pour objectif de présenter le contexte d'application de notre étude, en discutant du choix de technologie effectué et en présentant les concepts développés dans ce chapitre ainsi que les chapitres suivants.

4.2.1 Choix d'une technologie pour l'expérimentation : la fabrication additive

Nous avons appliqué dans nos travaux le SCP à un produit fabriqué par impression 3D FFF, dans le but de permettre l'observabilité d'un produit tout au long de sa phase de fabrication. Le choix d'opter pour le procédé de fabrication 3D par dépôt de filament (FFF) présente des avantages à deux niveaux.

Tout d'abord, dans le cadre du projet INEDIT, ce procédé est employé à la fois pendant la phase de production et durant le prototypage lors de la conception. Cette double utilisation est justifiée par plusieurs raisons.

- Premièrement, lors de la phase de conception, la caractéristique distinctive de la fabrication additive, notamment l'impression 3D, réside dans la connexion immédiate établie entre les utilisateurs avec le produit tangible résultant (Attaran, 2017). Cet outil de prototypage permet une intégration immédiate et concrète entre la conceptualisation virtuelle et la matérialisation physique du produit. L'impression 3D offre une visualisation directe du prototype, permettant aux concepteurs de mieux appréhender ses dimensions, ses formes et ses fonctionnalités, facilitant ainsi les ajustements et les itérations nécessaires pour parfaire le produit final. Cette proximité avec le produit permet non seulement une évaluation rapide de son apparence esthétique, mais également une évaluation fonctionnelle préliminaire.
- Grâce à l'impression 3D, les concepteurs peuvent rapidement réaliser des prototypes à petite échelle, testant ainsi différentes itérations du produit sans les contraintes et les coûts associés à la production de moules ou d'outillages spécifiques (Mellor, Hao and Zhang, 2014). Cette liberté de conception favorise l'exploration créative et permet d'itérer rapidement sur les designs, optimisant ainsi les performances et la fonctionnalité du produit final. De plus, cette approche itérative permet également de recueillir des retours d'expérience précoces, tant au sein de l'équipe de conception qu'auprès des parties prenantes externes, facilitant ainsi l'alignement des attentes et des objectifs du projet.
- L'utilisation du procédé FFF pendant la phase de conception favorise également une approche plus collaborative. Les prototypes physiques facilitent la communication entre les membres de l'équipe de conception ainsi qu'avec les parties prenantes externes. Les discussions et les décisions peuvent être étayées par des références tangibles, ce qui améliore la compréhension et l'alignement des objectifs.

Ainsi, l'adoption du procédé FFF dans le cadre de pratiques Do-It-Together dès la phase de conception offre un moyen puissant de matérialiser les idées et de favoriser l'innovation. En offrant une expérience tangible et interactive, cette approche permet aux concepteurs d'explorer librement les possibilités de design, de recueillir des retours précoces et de favoriser la collaboration, conduisant ainsi à des produits finaux mieux adaptés aux besoins des utilisateurs.

De plus, en phase de fabrication, l'un des principaux avantages de l'usage de l'impression 3D et de la fabrication additive au sens large, réside dans sa capacité à démocratiser la fabrication. En effet,

l'impression 3D est relativement accessible et simple à utiliser, ce qui signifie que pratiquement n'importe qui peut l'adopter et commencer à produire localement (Balletti, Ballarin and Guerra, 2017). Cette accessibilité permet de décentraliser la production, favorisant ainsi l'émergence de circuits courts impliquant plusieurs acteurs locaux. C'est pour cette raison que cette forme de fabrication a été favorisée dans le cadre du Do-It-Together et plus précisément au sein du projet INEDIT.

Grâce à cette approche, les produits peuvent être fabriqués plus près des consommateurs, réduisant ainsi les distances de transport et les délais associés. Cela peut non seulement réduire l'empreinte carbone, mais aussi renforcer les économies locales en favorisant les échanges au sein de la communauté (Pearce and Qian, 2022). De plus, la production locale permet une meilleure adaptation aux besoins spécifiques de chaque région, encourageant ainsi la diversité et la personnalisation des produits. De ce fait, la démocratisation de l'impression 3D favorise l'innovation en permettant à un large éventail de personnes d'expérimenter et de développer de nouvelles idées. Les barrières à l'entrée étant réduites, les makers, les entrepreneurs et les innovateurs peuvent plus facilement concrétiser leurs concepts, ce qui peut stimuler la créativité et l'entrepreneuriat local (Cruz Sanchez *et al.*, 2020).

D'autre part, la nature même des procédés de fabrication additive met en lumière l'intérêt d'un contrôle plus poussé lors de la phase de production du produit fabriqué. Contrairement aux méthodes de fabrication soustractives plus traditionnelles, telles que l'usinage CNC, où le matériau est enlevé pour former la pièce, la fabrication additive introduit une variabilité accrue en raison de la superposition de couches de matériau. Ainsi, les pièces peuvent être sujettes à des défauts tels que des irrégularités de surface, des porosités ou des déformations thermiques (Geng and Bidanda, 2021).

Cette variabilité peut être due à plusieurs facteurs, tels que la fusion imparfaite des couches, les variations de température, les différences dans la qualité du filament, etc. De plus, les propriétés mécaniques et structurelles de la pièce finale peuvent être sensibles à de petits changements dans les paramètres de fabrication, tels que la vitesse d'impression, la température de la buse, ou encore la densité de remplissage. Par conséquent, il devient important de surveiller étroitement le processus de fabrication pour détecter et corriger les éventuelles déviations qui pourraient compromettre la qualité du produit final. L'implémentation d'une interaction directe avec le produit permet non seulement de détecter rapidement les défauts ou les variations indésirables, mais également d'ajuster en temps réel les paramètres de fabrication pour optimiser la qualité et les performances de la pièce (Kantaros, Giannatsis and Karalekas, 2013; Kantaros *et al.*, 2022). Il est donc raisonnable de supposer que l'incorporation d'une interaction directe avec le produit aura un impact plus significatif sur les procédés

de fabrication de ce type. Ce lien direct permet une intervention rapide en cas de besoin, offrant ainsi un meilleur contrôle sur le processus de production et la qualité des pièces fabriquées.

Synthèse
○ Nous allons appliquer le Jumeau Numérique à un produit fabriqué par impression 3D FFF afin de garantir son observabilité tout au long de sa fabrication. Le choix du procédé FFF présente des avantages à deux niveaux : il permet une double utilisation pendant la conception et la production, et il démocratise la fabrication. ○ Pendant la phase de conception, le FFF offre une connexion immédiate avec le produit tangible, facilitant les ajustements et les itérations nécessaires. Cette approche itérative favorise l'exploration créative, recueille des retours d'expérience précoces et encourage la collaboration, conduisant à des produits finaux mieux adaptés. ○ En phase de production, le FFF démocratise la fabrication en la rendant accessible et simple à utiliser, favorisant ainsi la production locale et réduisant les distances de transport. Cela renforce les économies locales, encourage la diversité et la personnalisation des produits, et stimule l'innovation en réduisant les barrières à l'entrée pour les makers et les entrepreneurs. ○ Cependant, les procédés de fabrication additive introduisent une variabilité accrue, nécessitant un contrôle plus poussé pendant la production. L'interaction directe avec le produit permet de détecter rapidement les défauts et les variations indésirables, d'ajuster en temps réel les paramètres de fabrication et d'optimiser la qualité et les performances de la pièce.

4.2.2 Implémentation du SCP à l'impression 3D - concepts

Dans le contexte d'une pièce réalisée par fabrication additive (FFF), on considère qu'à une résistance mécanique optimale de cette pièce finie correspond, pour chaque point $M(x, y, z)$ de la pièce, une évolution de la température en fonction du temps à partir de l'instant de dépose de manière en ce point M , de la forme :

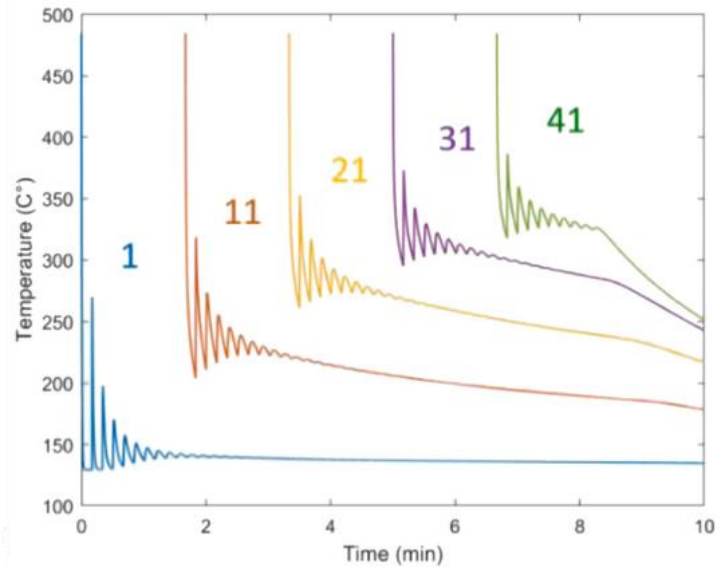


Figure 17 : distribution de la température d'un point sur différentes couches (ici la couche 1, 11, etc...) après déposition en fonction du temps, d'après (Basgul, Thieringer and Kurtz, 2021)

Un échantillonnage de cette évolution de la température en fonction du temps est réalisé, ce qui fournit un ensemble de systèmes (M, T_i^*, t_i) avec T_i^* la température consigne souhaitée au point M à un instant t_i .

Dans ce contexte, l'application du paradigme du Système Contrôlé par le Produit (SCP) revient à faire en sorte de commander l'impression de la pièce de façon à être au plus près de cette température idéale du produit en tout point du produit.

En utilisant un modèle dynamique du comportement thermique de la pièce, il est possible d'exprimer, à un certain instant t_i , la température consigne T_i^* en tout point M en fonction de différents paramètres de fabrication à différents instants t_j antérieurs à t_i . Ces paramètres peuvent être des paramètres fixés (géométrie de la pièce, propriétés rhéologiques et thermiques du matériau, température ambiante, ...), et des paramètres variables, qui constituent les conditions limites du solveur utilisé résoudre ce modèle pour chaque forme de phénomène thermique considéré, c'est-à-dire :

1. La conduction, qui dépend des propriétés thermiques du matériau imprimé, ainsi que des conditions limites :
 - T_{bed} : la température du lit d'impression
 - T_{fil} : la température du filament en sortie de l'extrudeur chauffé, lorsqu'il rentre en contact avec la matière déjà déposée

2. La convection, qui dépend de la forme du coefficient de convection de l'air, qui n'est dans ce contexte pas supposé constant mais va dépendre de :
 - $\%_{vent}$: la vitesse du ventilateur permettant un refroidissement local par convection du filament déposé
3. Le rayonnement, considéré comme négligeable dans le cadre de ces modèles thermiques (Brenken *et al.*, 2019).

Une fois ce modèle paramétrique déterminé, l'emploi du modèle inverse permet de déterminer un ou plusieurs ensembles de paramètres variables permettant de tendre au plus près au respect de cette consigne de température.

Reste la question de comment commander ces paramètres variables. En effet, le coefficient de convection thermique est directement relié à $\%_{vent}$ la vitesse de rotation du ventilateur, qui constitue une valeur commandée directement (en boucle ouverte) par l'imprimante. C'est également le cas de la température T_{bed} du lit d'impression, qui est commandée en boucle fermée par l'imprimante. Ce n'est néanmoins pas le cas de la température du filament en sortie de la buse, qui n'est pas une valeur commandée de manière directe par l'imprimante, mais dépend de plusieurs autres paramètres de fabrication commandés de manière directe par l'imprimante, notamment $\%_{vent}$ la vitesse de rotation du ventilateur et T_{buse} la température de chauffe de la buse de l'imprimante.

Puisque l'on se place dans le cadre du paradigme du SCP, on va donc devoir mettre en place une boucle de contrôle commande de cette température T_{fil} à travers une mesure directe de cette température, afin d'avoir une observabilité directe des phénomènes physiques intervenant au niveau du filament extrudé et déposé lors de la fabrication du produit final.

Cette partie de mon travail de thèse décrit l'application de mes contributions méthodologiques à travers la réalisation de plusieurs expérimentations centrées sur la fabrication d'une pièce par impression 3D (FFF).

L'objectif de ces expérimentations est de mettre en évidence l'hypothèse, développée dans le troisième chapitre de la thèse, énonçant que l'emploi du Jumeau Numérique d'un produit pendant sa fabrication, au sein du paradigme du Système Contrôlé par le Produit (SCP) en temps réel, permet de subordonner l'état de la pièce finale aux exigences de conception. En ce sens, ces expérimentations ont pour objectif de prouver ce principe de fabrication additive contrôlée par le produit à travers l'observabilité d'une donnée directe, la température, afin de modéliser les phénomènes thermiques mis en jeu et leur influence sur les propriétés mécaniques d'un produit.

Dans ce cadre, la suite de ce chapitre se penchera sur la mise en œuvre des étapes méthodologiques pour le contrôle en temps réel de la fabrication additive d'un produit à travers l'application du Jumeau Numérique, définies dans le chapitre précédent.

Rappel : Pour rendre le produit observable en temps réel et implémenter le paradigme du SCP dans ce contexte, nous avons proposé au chapitre précédent plusieurs étapes d'implémentation :

1. Définir les parties pertinentes de l'état interne du produit, en accord avec les critères définis par les parties prenantes.
2. Identifier les variables à observer pour déduire chaque partie de l'état interne du produit. Cela implique la création de modèles virtuels haute-fidélité, basés soit sur des modèles comportementaux, soit sur des modèles structurels.
3. Mettre en œuvre une observation en temps réel de ces variables à l'aide de capteurs, malgré les défis liés à la mesure pendant les processus de fabrication.
4. Implémenter un contrôle du processus de production à travers le Jumeau Numérique, transformant ainsi le Digital Shadow en Digital Twin et permettant le paradigme du système contrôlé par le produit.

4.3 Définition des parties de l'état interne de notre produit à étudier

4.3.1 Choix d'un critère d'analyse de la pièce finale

Pour examiner les différents critères de performance d'une pièce imprimée en 3D, il est important de prendre en compte plusieurs aspects. Parmi ces aspects, la résistance mécanique est primordiale en raison de son impact direct sur la fonctionnalité et la durabilité des pièces. Une résistance mécanique élevée garantit la fiabilité des pièces, surtout dans des applications soumises à des contraintes mécaniques importantes. Outre la résistance mécanique, le respect de la géométrie, aussi appelé précision dimensionnelle, est un autre critère important. Cela fait référence à la précision avec laquelle la pièce imprimée correspond aux spécifications dimensionnelles de conception. Tout écart ou déformation peut compromettre l'assemblage et la fonctionnalité de la pièce (Cruz Sanchez *et al.*, 2014; Mohamed, Masood and Bhowmik, 2017). La rugosité de surface est également un aspect qui peut être considéré. Une rugosité excessive peut affecter l'esthétique, la fonctionnalité et l'interaction de la pièce avec d'autres pièces. Les paramètres influençant la rugosité comprennent notamment la

résolution de l'impression, la vitesse d'impression et les caractéristiques du matériau. En plus de ces critères, la porosité, la résistance à la fatigue, la conductivité thermique et électrique, ainsi que la stabilité chimique sont également des aspects à prendre en considération lors de l'évaluation des performances d'une pièce imprimée en 3D (Yosofi, Kerbrat and Mognol, 2018).

Parmi ces différents critères, la résistance mécanique apparaît comme un choix particulièrement pertinent pour les expérimentations successives du paradigme du Système Contrôlé par le Produit dans la fabrication d'une pièce en impression 3D. La résistance mécanique est un paramètre fondamental dans de nombreuses applications industrielles et fonctionnelles, et elle peut être mesurée de manière relativement simple et précise à l'aide de tests standardisés, ce qui facilite l'évaluation quantitative des performances de la pièce. De plus, la résistance mécanique d'une pièce peut être directement influencée par divers paramètres de fabrication, tels que la température d'impression, la densité de remplissage, la vitesse d'impression, etc. Contrôler ces paramètres permet d'explorer l'impact de chacun sur la performance finale de la pièce. Enfin, bien que ce soit un paramètre important à quantifier en impression 3D, peu d'articles s'intéressent à proposer une observabilité directe de celui-ci, là où plusieurs articles ont déjà amorcés la construction de Jumeaux Numériques pour le contrôle des paramètres géométriques (Zhu *et al.*, 2018; Moretti, Rossi and Senin, 2021).

4.3.2 Observabilité en temps réel de la résistance mécanique d'une pièce pendant sa fabrication

Nous avons décidé de choisir comme paramètre à contrôler la résistance mécanique du produit. Un problème apparaît alors : il n'est pas possible d'observer directement la résistance mécanique d'une pièce en cours de fabrication. En effet, la résistance mécanique d'une pièce est généralement évaluée par des tests physiques qui nécessitent des charges externes spécifiques appliquées à la pièce dans des conditions contrôlées. Ces tests sont effectués après que la pièce a été entièrement fabriquée et a subi un processus de post-traitement éventuel. La réalisation de ces tests destructifs n'est donc pas possible pendant le processus de fabrication. Cela nous pose problème, car l'emploi du paradigme du Système Contrôlé par le Produit (SCP) en temps réel pendant la fabrication implique une observabilité directe et continue des paramètres de conception afin de vérifier et valider que le produit est ancré sur son ingénierie collaborative de conception.

Cependant, bien qu'il ne soit pas possible d'observer directement la résistance mécanique pendant la fabrication par impression 3D, il est possible de surveiller et de contrôler d'autres propriétés liées à la résistance mécanique qui peuvent servir d'indicateurs de qualité pendant le processus d'impression.

En effet, la résistance mécanique d'une pièce dépend de plusieurs facteurs, notamment de sa géométrie, de son orientation lors de l'impression, du matériau utilisé, des paramètres de processus d'impression, etc. Ces facteurs interagissent de manière complexe pour déterminer les propriétés mécaniques finales de la pièce (Türk *et al.*, 2017). Il apparaît donc possible d'observer ces différents paramètres afin d'estimer l'état des propriétés mécaniques de la pièce finale tout au long du processus de fabrication.

La résistance mécanique d'une pièce imprimée en 3D fait référence à sa capacité à supporter des charges externes sans subir de déformations excessives ou de ruptures. Dans le contexte de nos expérimentations, nous avons décidé de nous intéresser à une partie spécifique de la résistance mécanique, à savoir la résistance d'une pièce à la traction. Contrairement à la fabrication soustractive (usinage, fraisage, etc...), la nature du procédé de fabrication additive fait que, bien que le matériau utilisé (PLA, ABS, etc...) soit le plus généralement isotrope, le produit final sera anisotrope, et présentera donc des performances, notamment mécaniques, différentes (Prajapati *et al.*, 2018), dans le sens des filaments ou dans le sens normal aux filaments (Mohan *et al.*, 2017; Gao, Yu and Li, 2020).

La résistance mécanique en traction dans le sens des filaments dépend principalement des propriétés du matériau utilisé, là où la résistance mécanique dans le sens orthogonal aux fibres dépend principalement de la qualité de la liaison inter-couches (Bräuer, Sachsenhofer and Lang, 2021). La liaison inter-couches se réfère à la solidité de l'adhésion entre les différentes couches de matériau déposées lors du processus d'impression 3D. Une liaison inter-couches insuffisante peut entraîner des défaillances telles que le décollement des couches, la fragmentation ou la rupture de la pièce, compromettant ainsi sa résistance mécanique et sa fonctionnalité. Une bonne liaison inter-couches dépend de plusieurs facteurs, notamment l'adhésion entre les matériaux, la température d'extrusion, la vitesse d'impression, la densité de remplissage, la résolution de couche, et le refroidissement adéquat entre les couches (Aliheidari *et al.*, 2018; Vanaei *et al.*, 2020).

Ce qu'il faut retenir de notre choix d'aspect du produit à observer
○ Dans le cadre de l'impression 3D FFF, nous nous concentrons sur la résistance mécanique de la pièce finale. ○ Malheureusement, il n'est pas possible de mesurer cette résistance pendant l'impression. Cependant, nous pouvons surveiller d'autres facteurs liés à cette résistance, comme la qualité de la liaison entre les couches de matériau déposé, qui influence directement la résistance mécanique.

- En observant ces aspects, nous pouvons estimer la solidité de la pièce en cours de fabrication et ajuster les paramètres si nécessaire pour garantir des performances optimales.

4.4 Identification des variables à observer permettant de déterminer l'état interne du produit

4.4.1 Identification des phénomènes physiques permettant de décrire l'état interne du système

Lors de l'impression 3D, le matériau utilisé est chauffé à une température spécifique pour le rendre suffisamment fluide afin qu'il puisse être déposé de manière précise et contrôlée sur le plateau de construction. Cette fusion du matériau est généralement réalisée à l'aide d'une buse d'extrusion chauffée qui chauffe le matériau jusqu'à son point de fusion. Une fois fondu, le matériau est extrudé sous forme de filament et déposé sur le plateau de construction pour former la première couche de la pièce.

Après la fusion du matériau, la première couche est déposée sur le plateau de construction (on parle également du lit de l'imprimante, *bed* en anglais). Pendant le dépôt de la première couche, le matériau fondu est en contact avec la surface du plateau, qui est en général chauffée pour favoriser l'adhésion du matériau. Une fois déposée, la première couche commence à se refroidir et à se solidifier au contact de la surface du lit. Après la déposition de la première couche, le processus est répété pour déposer les couches suivantes de matériau fondu. Après la fusion du matériau, la couche déposée se solidifie rapidement lorsqu'elle entre en contact avec le lit d'impression ou la couche précédemment imprimée. La solidification du matériau est causée par le refroidissement rapide à mesure qu'il est exposé à l'air ambiant. Cette solidification permet à la couche fraîchement déposée de former une liaison solide avec la couche précédente, appelée la liaison inter-couches. Lorsqu'une couche supérieure est déposée sur une couche inférieure, la chaleur peut également se diffuser de la couche inférieure vers la couche inférieure à cette dernière, ce qui peut provoquer des phénomènes de recristallisation et de consolidation, favorisant ainsi la solidification du matériau à l'interface entre les deux couches. Une diffusion de chaleur efficace contribue à renforcer la liaison inter-couches et à minimiser les défauts d'adhésion (Deshpande *et al.*, 2019; Bräuer, Sachsenhofer and Lang, 2021).

4.4.2 Etude des phénomènes physiques influant sur la liaison inter-couches

Pour assurer la conformité du produit final vis-à-vis de la consigne de résistance mécanique, il est nécessaire pour le produit circulant d'être l'orchestrateur de cette fabrication subordonnée à l'ingénierie collaborative de conception. Pour cela, il faut assurer la visualisation et l'interaction avec le produit tout au long de sa fabrication. Dans ces expérimentations, nous allons donc nous intéresser à l'observation et au contrôle des phénomènes thermiques intervenant dans la formation des liaisons inter-couches.

Plusieurs formes de phénomènes thermiques participent à la formation de cette liaison inter-couches lors de la dépose du filament extrudé.

4.4.2.1 Conduction thermique

La conduction thermique joue un rôle dans la formation de la liaison inter-couches en impression 3D. Ce phénomène intervient lorsque la chaleur se propage à travers les différentes couches de matériau, favorisant ainsi la fusion et la solidification du matériau à l'interface entre les couches. Lorsque la couche supérieure est déposée sur la couche inférieure pendant le processus d'impression, la chaleur est transférée de la couche supérieure vers la couche inférieure par conduction thermique. Ce transfert de chaleur permet de maintenir une température suffisamment élevée à l'interface entre les deux couches pour faciliter la fusion du matériau et la formation d'une liaison solide. La conduction thermique dépend des propriétés thermiques du matériau imprimé, ainsi que des conditions limites :

- T_{bed} : la température du lit d'impression ;
- T_{fil} : la température du filament en sortie de l'extrudeur chauffé, lorsqu'il rentre en contact avec la matière déjà déposée ;
- λ : la conductivité thermique du matériau extrudé ;
- Les dimensions de la partie déjà imprimée du produit.

En réalité, la pièce imprimée n'est également pas isotrope d'un point de vue thermique, car la succession de couches de filaments fait intervenir une microstructure différente selon la température d'extrusion, la direction de fabrication, et les propriétés thermiques du matériau (Prajapati *et al.*, 2018). Dans le cadre des modèles utilisés dans ces travaux de recherche, nous ferons l'approximation d'une pièce isotrope d'un point de vue thermique.

4.4.2.2 Convection thermique

La convection thermique implique le transfert d'énergie thermique dans un fluide en mouvement ou entre un fluide en mouvement et une paroi solide. Ce transfert thermique combine deux mécanismes de transfert fondamentaux, l'advection et la diffusion. Dans le cadre de l'impression 3D, la convection se manifeste lorsque la chaleur est transmise par le déplacement de masses de fluide, telles que l'air. Cela génère des courants de convection qui impactent le processus de refroidissement et de solidification du matériau. Dans le contexte de l'impression 3D, le ventilateur joue un rôle crucial en favorisant la convection thermique. En effet, il est généralement utilisé pour fournir un flux d'air dirigé vers la zone d'impression, ce qui accélère le refroidissement des couches déposées et favorise la solidification du matériau (Lu and Wang, 2018). Cependant, il est important de noter que le ventilateur peut également avoir des effets indésirables s'il est utilisé de manière excessive. Un flux d'air trop fort peut entraîner un refroidissement trop rapide des couches de matériau, ce qui peut compromettre la qualité de la liaison inter-couches en provoquant des défauts d'adhésion ou des fissures. Par conséquent, un réglage approprié de la vitesse du ventilateur est nécessaire pour garantir des propriétés mécaniques optimales de la pièce imprimée. La convection dépend du coefficient d'échange convectif avec l'air h , qui n'est dans ce contexte pas supposé constant mais va dépendre de :

- v_{vent} : la vitesse du ventilateur ;
- Différents paramètres (orientation, puissance max, ...) du ventilateur ;
- Différents paramètres (capacité thermique massique, masse volumique, ...) du fluide, ici l'air ;
- T_{ext} : la température du milieu extérieur, supposée constante.

4.4.2.3 Rayonnement thermique

Dans le processus d'impression 3D, les échanges thermiques liés au rayonnement sont généralement négligés, d'une part parce que les imprimantes 3D utilisent des températures relativement basses pour lesquelles les échanges thermiques par rayonnement sont généralement négligeables par rapport aux échanges thermiques par conduction et convection.

D'autre part, les dimensions des pièces imprimées sont souvent relativement petites par rapport aux longueurs d'onde de la radiation thermique, ce qui implique que les effets du rayonnement thermique sont limités et peuvent être négligés dans les analyses thermiques (Prajapati, Ravoori and Jain, 2018).

Enfin, la prise en compte du rayonnement thermique dans les modèles thermiques en impression 3D peut ajouter une complexité significative, en particulier si les propriétés optiques des matériaux doivent être prises en compte. Cette complexité supplémentaire n'est pas justifiée compte tenu de l'ampleur des effets du rayonnement thermique. Pour toutes ces raisons, l'effet des transferts thermiques par rayonnement est considéré négligeable dans la littérature, et notamment dans les différents travaux de recherche proposant des modélisations des phénomènes thermiques dans le cadre de la fabrication additive (Brenken *et al.*, 2019).

Pour ces différentes raisons, nous avons fait le choix de ne pas prendre en compte les phénomènes de rayonnement dans le cadre de ces travaux de recherche.

4.4.3 Visualisation et contrôle des paramètres influant sur la liaison inter-couches

Les phénomènes thermiques intervenant dans la formation des liaisons inter-couches ayant été identifiés, et l'observation et le contrôle directs de ces phénomènes n'étant pas réalisable, il va être nécessaire de passer par l'observation des différents paramètres (du matériau et du procédé de fabrication) exerçant une influence sur ces phénomènes thermiques.

Nous avons identifié pour chacun des phénomènes thermiques les paramètres du procédé et du matériau qui pouvaient influencer sur la formation de la liaison inter-couches du filament.

Notre objectif est de contrôler la fabrication par le produit circulant, nous allons donc uniquement choisir d'étudier l'influence des paramètres de fabrication, en considérant que les autres paramètres identifiés précédemment sont fixés.

Rappel : Dans le chapitre précédent, nous avons vu que pour déterminer l'ensemble des variables à observer permettant de déterminer l'état interne du produit, deux méthodes d'abstraction sont possibles (Segovia and Garcia-Alfaro, 2022) :

1. Les modèles comportementaux, qui utilisent des informations collectées pour définir le comportement d'un système.
2. Les modèles structurels, qui décrivent l'organisation des parties d'un système et les lois physiques qui le régissent.

Dans ce chapitre, nous avons décidé d'utiliser un modèle comportemental afin de déterminer les paramètres ayant un impact sur le produit final, de manière empirique.

Ce modèle sera ensuite confronté dans le chapitre 6 à un modèle structurel, basé sur la modélisation de phénomènes thermiques par les méthodes de Monte-Carlo.

Nous choisissons donc d'observer 3 paramètres de fabrication, qui interviennent dans les phénomènes thermiques lors de la fabrication, dont résulte la résistance mécanique inter-couche de la pièce finale.

Ces trois paramètres sont :

- T_{bed} : la température du lit d'impression ;
- $\%_{vent}$: la vitesse du ventilateur ;
- T_{fil} : la température du filament en sortie de l'extrudeur chauffé, lorsqu'il rentre en contact avec la matière déjà déposée.

En plus de ces paramètres, nous allons étudier l'influence éventuelle de la position de la matière extrudée par rapport à la pièce sur ces phénomènes thermiques.

La question que l'on se pose, afin de mettre en place lors de la fabrication de cette pièce le paradigme du Système Contrôlé par le Produit, est : comment observer directement et commander ces trois paramètres tout au long du processus de fabrication d'une pièce, afin de pouvoir en déduire les phénomènes thermiques intervenant dans la fabrication de la pièce, et de déterminer ainsi la résistance mécanique de la pièce finale ? (Et commander tout ça en fonction de la résistance mécanique désirée).

Parmi ces trois paramètres, deux sont commandés directement par l'imprimante 3D utilisée. En effet, la température T_{bed} du lit d'impression est contrôlée en boucle fermée au sein de l'imprimante. La commande de température est relayée sous forme de courant électrique à une série de résistors qui vont générer une chauffe du plateau, et un capteur thermocouple va venir mesurer la température du plateau. Par une communication avec le port série de l'imprimante, il est donc possible pour un acteur extérieur à l'imprimante d'observer en temps réel la température du lit d'impression et de la commander.

La vitesse de rotation du ventilateur est quant à elle commandée en boucle ouverte par l'imprimante, c'est-à-dire que l'imprimante va convertir cette information de vitesse en une certaine tension avec laquelle alimenter le ventilateur. Le ventilateur n'est pas pourvu d'un capteur de vitesse de rotation, il n'est donc pas possible d'observer de manière directe la valeur de ce paramètre de fabrication. On

considèrera ici le ventilateur comme un actionneur parfait, qui prend comme vitesse de rotation réelle sa consigne de vitesse.

Par contre, la température T_{fil} du filament en sortie de l'extrudeur chauffé n'est une valeur ni observée ni contrôlée par l'imprimante lors de la fabrication d'une pièce. Il va donc falloir mettre en place un système afin d'observer directement et de commander la température du fil pendant toute l'impression.

Nous allons donc, dans le reste de ce chapitre, nous intéresser d'une part à l'observation directe de la température du filament, et d'autre part à la mise en place de la commande de cette température.

Ce qu'il faut retenir de notre choix de variables à observer
○ Dans le processus d'impression 3D, le choix d'un critère d'analyse pour évaluer la pièce finale se concentre sur la résistance mécanique, qui dépend en grande partie de la qualité de la liaison entre les différentes couches de matériau. Pour comprendre et contrôler cette liaison, il est essentiel d'étudier les phénomènes thermiques qui interviennent lors de l'impression. ○ Trois principaux phénomènes thermiques sont identifiés : la conduction thermique, la convection thermique et le rayonnement thermique. Dans le cadre de cette analyse, le rayonnement thermique est négligé en raison de son impact limité dans le processus d'impression 3D. ○ Pour observer et contrôler les paramètres influant sur la liaison inter-couches, trois paramètres de fabrication sont identifiés : la température du lit d'impression, la vitesse du ventilateur et la température du filament en sortie de l'extrudeur. Parmi ces paramètres, seul le lit d'impression est directement contrôlé par l'imprimante, tandis que la vitesse du ventilateur est commandée en boucle ouverte. En revanche, la température du filament doit être observée et contrôlée de manière externe.

4.5 Implémentation d'une observabilité directe en temps réel de la température du filament au cours de la fabrication

L'objectif de cette partie est d'étudier la mise en place d'une observabilité directe et en temps réel de la température en sortie de l'extrudeur.

Pour cela, nous allons intégrer à l'imprimante 3D une caméra thermique, comme représenté à la Figure 18. En intégrant une caméra thermique à l'extrudeur, il devient possible de surveiller en temps réel la température du filament pendant son extrusion. Cette caméra thermique est équipée d'un capteur sensible aux infrarouges, capable de détecter et de mesurer la chaleur émise par le filament fondu. Les données recueillies par la caméra sont ensuite analysées et affichées sur un écran ou transmises à un système de contrôle informatique, offrant ainsi une visualisation en temps réel de la température du filament.

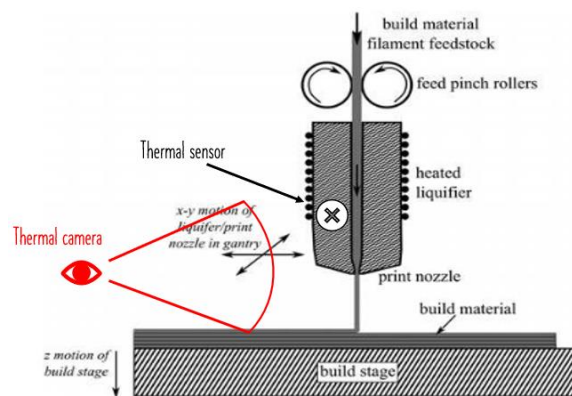


Figure 18 : schéma d'implémentation d'une caméra pour l'observation de la température du filament en sortie de l'extrudeur

4.5.1 Présentation de l'équipement utilisé dans cette expérimentation

Les impressions sont réalisées à l'aide d'une imprimante ALTO personnalisée, et en utilisant du filament PolyTerra PLA. Nous avons choisi ce filament pour plusieurs raisons : il a une plage de température d'impression de 190°C à 230°C, une finition mate qui permet des mesures plus précises pour un capteur infrarouge qu'un filament brillant, et c'est un matériau écologique, car il peut être composté directement dans la nature. Pendant le processus d'impression, une caméra infrarouge, modèle OPTRIS Xi-400, sera utilisée pour mesurer la température du filament en sortie de l'extrudeur pendant la fabrication.

L'Alchimies Alto, présentée Figure 19, est une imprimante 3D FDM de bureau professionnelle, produite par la société française Alchimies. Cette imprimante offre un volume d'impression de 300 x 300 x 300

mm et deux têtes d'extrusion. Le volume d'impression est légèrement réduit lors de l'utilisation des deux têtes d'impression simultanément. L'imprimante utilisée lors de nos expérimentations a été modifiée en retirant l'une des têtes d'impression, la transformant ainsi en une imprimante classique à une seule tête. Elle permet l'extrusion de filaments de diamètre $\varnothing$ 1,75 mm à travers une buse de $\varnothing$ 0,4 mm à une vitesse variant de 10 à 120 mm/sec, avec une température de chauffe de la buse d'extrusion allant jusqu'à 250°C.

La raison pour laquelle nous avons utilisé cette imprimante, alors que notre laboratoire possédait des imprimantes plus récentes, se retrouve dans les conditions d'expériences que nous avons définies précédemment. En effet, cette imprimante dispose d'une enceinte fermée pouvant être contrôlée en température par deux ventilateurs et un capteur de température de l'enceinte. Cela permet de conserver une température de l'air ambiant constant durant toute l'impression, et fixée à une température précise peu importe la température de l'air extérieur.



Figure 19 : Imprimante ALTO

Contrairement à d'autres imprimantes présentant une enceinte fermée, son enceinte composée de profilés mécaniques et de vitres en plexiglas pouvait facilement être modifiée pour permettre d'incorporer des éléments de mesure extérieurs dont par exemple une caméra thermique.

Cette imprimante fonctionne sous RepRapFirmware⁶, et peut communiquer avec un ordinateur via une connexion USB à son port série ou via un serveur accessible via WIFI, ce qui permet de recueillir des données comme la température de la buse, du lit, ou la position de la tête d'extrusion en temps

⁶ https://docs.duet3d.com/User_manual/RepRapFirmware/RepRapFirmware_overview

réel, ainsi que de communiquer des consignes pour ces différents actionneurs pendant la fabrication d'une pièce.

La caméra montée sur cette imprimante est la caméra thermique Xi 400. Cette caméra mesure avec précision les températures de -20 à 900°C, avec une résolution de 382 par 288 pixels. Elle présente un taux de rafraîchissement de 80 Hz, ce qui permet la détection de changements rapides de température à la surface de l'objet testé.

La caméra Xi 400 a été montée sur l'imprimante Alto, sur l'un des profilés en aluminium supportant l'extrudeur, afin de suivre la position de l'extrudeur sur l'axe z (hauteur) pendant une impression. Une découpe a été réalisée sur l'une des parois de l'enceinte de l'Alto pour permettre au capteur de se déplacer le long de l'axe z. Cette ouverture a été « camouflée » afin de permettre le passage de la caméra tout en évitant au maximum le passage de l'air, et il sera supposé dans cette expérience que cette ouverture n'aura pas d'impact sur la capacité de l'Alto à réguler la température de la pièce et donc n'aura pas d'impact sur les résultats de ces expériences.

4.5.2 Mesures avec la caméra thermique : identification de la température de l'extrudeur

Le logiciel d'analyse IR fournit avec la caméra, Optris PIX Connect, permet l'enregistrement et l'analyse en temps réel des observations infrarouges réalisées à l'aide des caméras infrarouges Optris.

Après la mise en place de la caméra sur le bâti de l'imprimante, il est donc possible d'effectuer des mesures de température pendant des impressions, comme présenté Figure 20.

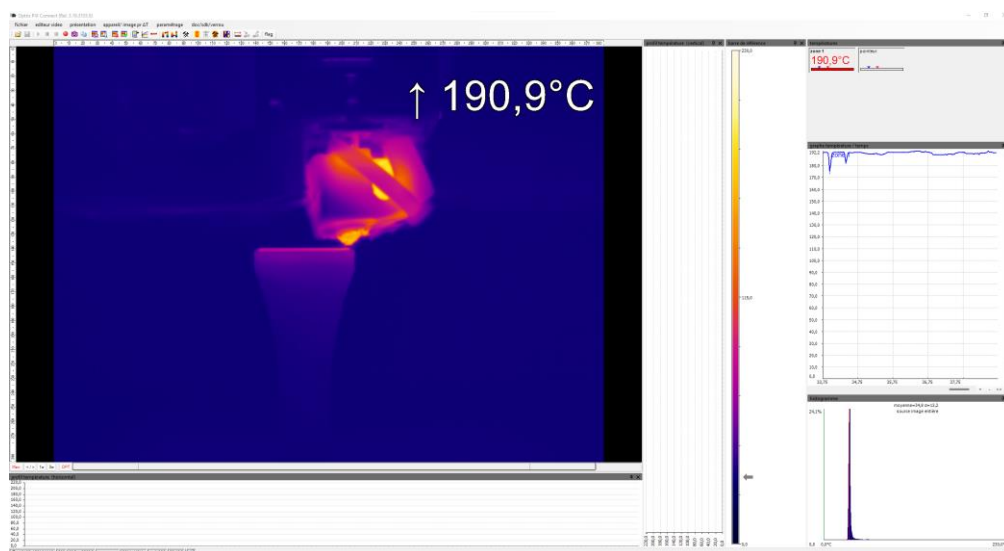


Figure 20 : Capture d'écran du logiciel PIX Connect pendant l'impression d'une éprouvette de traction sur l'imprimante Alto

Un premier essai a eu pour objectif de mesurer la température dans une petite zone de l'image thermique acquise, située en dessous de la buse, afin de déterminer pour une certaine température de l'extrudeur (ici 210°C), quelle est la température du filament en sortie de cet extrudeur.

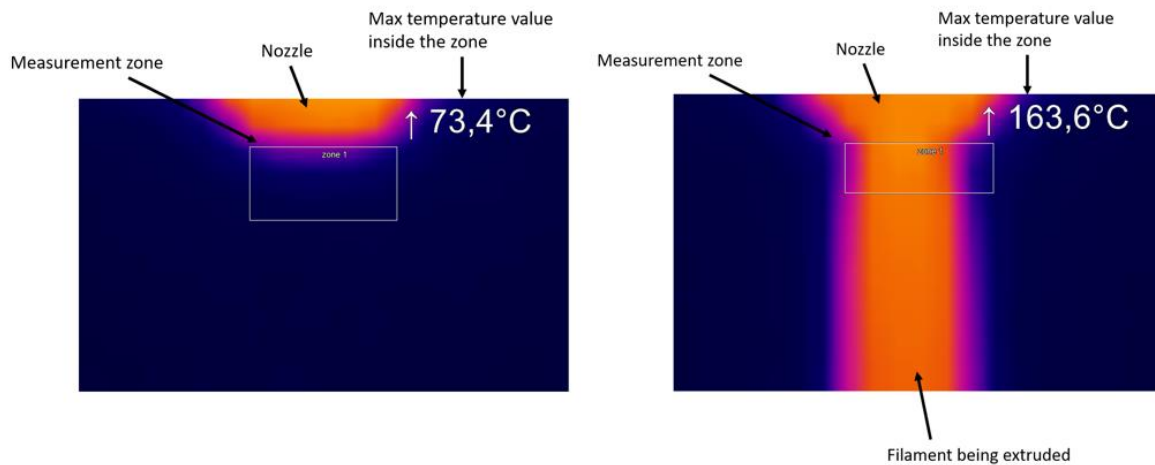


Figure 21 : Observation de la température du filament par la caméra thermique via le logiciel Optris

L'observation de la mesure de température max dans cette zone avant extrusion était de 73,4°C, due à la chaleur émise par l'extrudeur sous forme de convection, et lors de l'extrusion, le filament affichait une température maximale de 163.6°C. Cela nous a permis d'identifier un problème immédiat : la température du filament en sortie de l'extrudeur et la température de l'extrudeur sont très différentes. On ne peut donc pas se servir de la température de l'extrudeur comme température du filament en sortie de celui-ci, une observation directe de cette température est bien nécessaire.

4.5.3 Développement d'un module d'acquisition de données de température en temps réel

Comme nous voulons créer le Jumeau Numérique d'un produit lors de son impression, nous devons accéder aux données en direct du produit et envoyer des commandes à l'imprimante en fonction de ces données. Ainsi, nous devons avoir accès aux données en direct provenant de l'Optris Xi 400. Le logiciel PIX Connect permet de visualiser les données en temps réel, mais pas d'exporter ces données vers un logiciel de traitement de données en temps réel.

Ainsi, nous avons besoin d'un module logiciel différent pour acquérir des données en temps réel et pour envoyer et recevoir des informations vers et depuis l'imprimante. Dans ce contexte, il a été décidé d'utiliser le logiciel MATLAB comme base pour ce Jumeau Numérique.

MATLAB ne dispose d'aucun outil intégré pour recevoir et interpréter les données des capteurs thermiques. Ainsi, nous avons dû implémenter le nôtre, basé sur le kit de développement logiciel (SDK) développé par la société Evocortex⁷ (Voir algorithme en Annexe 1). Il en résulte l'acquisition en temps réel d'une matrice de température de dimension 382 par 288, correspondant à chaque pixel de la caméra.

À l'aide de cette matrice, nous pouvons ensuite traiter les données de température en sélectionnant une zone de mesure, en trouvant le maximum dans cette zone, etc. pour obtenir des informations pertinentes sur l'état de l'imprimante et sur l'état du produit pendant l'impression. Une annexe de ce travail de thèse présente les programmes Matlab utilisés pour l'acquisition, le traitement de données et la commande de l'imprimante (voir Annexe 1).

La mise en place de ce programme nous permet donc d'acquérir des données issues de la caméra thermique en temps réelles, qui peuvent être traitées en temps-réel par, afin de déterminer à chaque instant d'un processus de fabrication la température du filament déposé sur la pièce imprimée.

Un essai a été réalisé sur une pièce dite « *wall* », c'est-à-dire une pièce ne présentant qu'une seule couche de filament d'épaisseur. En effet, la limite actuelle de notre expérimentation est que notre caméra ne peut pas observer des pièces en trois dimensions, et se limite donc à l'observation de pièces en deux dimensions, c'est-à-dire d'une seule couche d'épaisseur. Cette limitation sera discutée dans la partie *Perspectives* à la fin du chapitre 5 de ce document de thèse.

Le « *wall* » utilisé pour les différentes expérimentations de ce travail de thèse, présenté Figure 22, mesure 50x50x0.8mm.

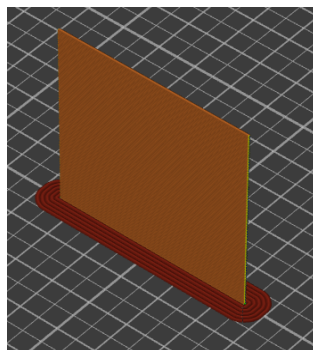


Figure 22 : Aperçu dans un slicer du fichier .STL du « *wall* » utilisé pour nos expérimentations

⁷ www.evocortex.com

Une série d'impressions de ce « wall » a été réalisée, avec des paramètres d'impression fixés conformes aux recommandations d'impression pour le matériau utilisé, à savoir ($T_{bed} = 60^{\circ}C$, $T_{buse} = 210^{\circ}C$, $\%_{vent} = 100\%$), et la température du filament à la sortie de l'extrudeur/à l'interface de la buse a été mesurée pendant toute l'impression. La Figure 23 représente la température du filament extrudé au moment de la dépose du filament.

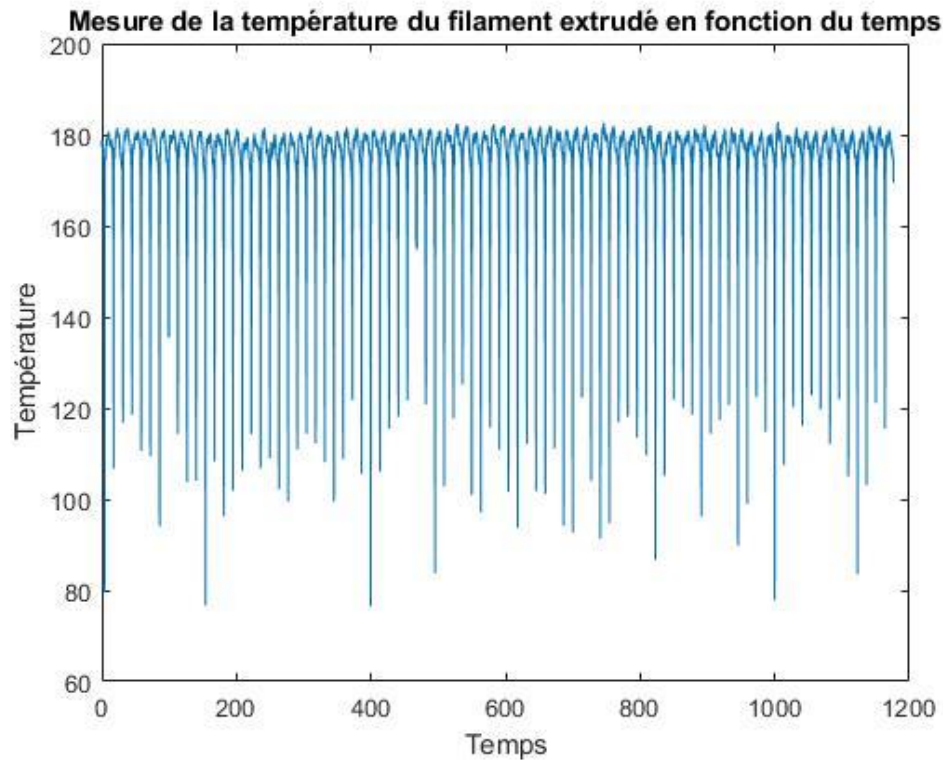


Figure 23 : Mesure de la température du filament en fonction du temps, avec mesures parasites

Le problème de cette acquisition de données réside dans l'apparition, au moment de la mesure, de données parasites. On voit en effet de manière régulière sur cette figure la présence de « chutes » brutales de température. Ces mesures correspondent en fait au passage d'une couche à une autre, puisque l'imprimante arrête d'extruder pour retourner se positionner à son point de départ pour démarrer ensuite l'extrusion de la couche suivante. Pendant ce déplacement, la caméra ne mesure donc plus le filament en sortie de la buse mais la température de l'air à la limite de la buse, qui est nettement inférieure.

Le code d'acquisition de ces mesures a donc été modifié pour retirer ces points de mesure (voir Annexe 1). L'évolution de la température du filament extrudé est représentée à la Figure 24.

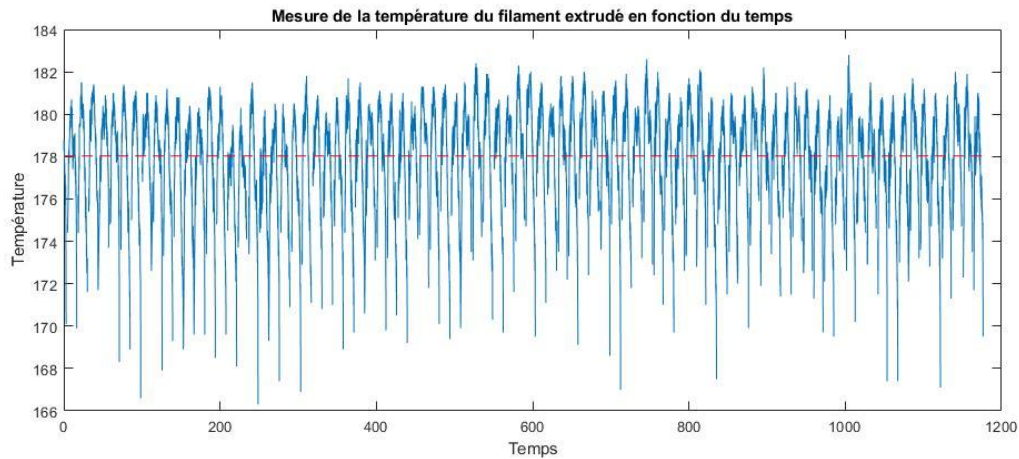


Figure 24 : Mesure de la température du filament en fonction du temps, sans mesures parasites

Ces résultats montrent des variations importantes de température mesurée au cours de la mesure. Outre les variations de température du filament extrudé lors de l'impression, une partie de ces variations de température peut s'expliquer par plusieurs facteurs liés à l'acquisition de la mesure, tels que la précision du capteur ($\pm 0,2^\circ\text{C}$) mais également par la résolution de la caméra et la distance entre celle-ci et la tête d'impression. Dans ce cadre, pour permettre une robustesse de ces mesures, nous avons réalisé des acquisitions sur des temps longs afin de minimiser l'impact de la précision de mesure. De plus, dans les chapitres suivants, lorsque nous allons chercher à observer la distribution de la température du filament durant la fabrication d'une pièce, avec ou sans contrôle par le produit, nous allons utiliser des mesures robustes comme la médiane et les quartiles, en traçant des diagrammes en boîte (boîte à moustaches), afin de garantir une analyse pertinente de ces données.

Ici, ces résultats vont déjà nous permettre de soulever plusieurs observations :

La température médiane mesurée du filament extrudé T_{fil} est de $178,1^\circ\text{C}$, alors que la température de commande de la buse T_{buse} est fixée à 210°C . Cet écart justifie notre choix d'observer directement la température du fil, et de ne pas considérer cette température comme égale à celle de la buse.

On observe une variation importante de la température durant la fabrication du produit, avec des valeurs extrêmes de $182,8^\circ\text{C}$ et $166,4^\circ\text{C}$. Ces variations de température durant l'impression impliquent des variations de liaison inter-couche au sein du produit final. Une valeur constante de température du filament déposé serait préférable, car elle impliquerait des liaisons inter-couches homogènes, et donc une résistance mécanique homogène au sein de la pièce finale. Ce constat justifie notre volonté de contrôler le process de fabrication à partir de l'observation de l'état réel du produit.

Il est donc bien nécessaire de contrôler cette température T_{fil} du filament extrudé durant toute la fabrication d'une pièce, afin de garantir une température homogène du filament lors de l'extrusion, et

de maintenir une qualité de la liaison inter-couches et une résistance mécanique constante partout dans la pièce imprimée.

Cette partie a présenté l'application d'un capteur afin de réaliser une observation directe des différents paramètres influant sur la résistance mécanique inter-couches lors d'un processus de fabrication additive. Un de ces paramètres ne pouvant être observé directement à l'aide des capteurs inclus dans l'imprimante utilisée, il a été nécessaire de rajouter un nouveau capteur « ad hoc » afin de pouvoir recueillir toutes les informations.

Synthèse de notre expérimentation

- Une solution pour observer la température du filament consiste à intégrer une caméra thermique à l'extrudeur pour surveiller en temps réel la température du filament pendant son extrusion. Cette caméra permet d'obtenir des données précises sur la température du filament, même si elle présente des défis techniques pour son intégration et son utilisation.
- Pour acquérir et traiter les données en temps réel, un logiciel comme MATLAB est utilisé. Ce logiciel permet d'interpréter les données de la caméra thermique et de contrôler l'imprimante en fonction de ces données, offrant ainsi la possibilité de créer un Jumeau Numérique du processus d'impression.
- Une expérimentation sur une pièce « wall » montre l'importance de contrôler la température du filament pour garantir une qualité homogène de la liaison inter-couches et une résistance mécanique constante dans toute la pièce imprimée.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre de thèse, nous avons examiné en détail les phénomènes thermiques impliqués dans la formation des liaisons inter-couches lors du processus d'impression 3D. Nous avons identifié les variables clés à observer pour déterminer l'état interne du produit, ainsi que les paramètres de fabrication influant sur ces phénomènes thermiques, notamment la température du lit d'impression, la vitesse du ventilateur et la température du filament.

En mettant l'accent sur la conduction thermique et la convection thermique, nous avons souligné l'importance de ces mécanismes dans la qualité des liaisons inter-couches et, par extension, dans la résistance mécanique de la pièce finale. De plus, nous avons mis en place l'observation directe de ces différents paramètres tout au long du processus d'impression 3D.

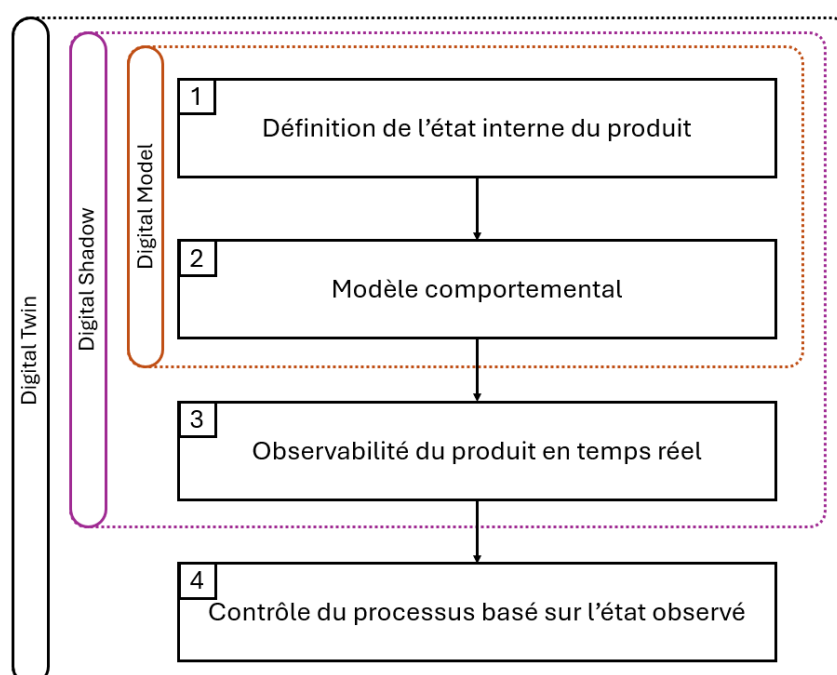
Ce chapitre nous a permis de construire un premier Jumeau Numérique de notre produit fabriqué par impression 3D. Nous avons identifié les paramètres nécessaires à l'observabilité de notre produit, et nous avons mis en place cette observabilité, à travers l'emploi d'une caméra thermique capable de suivre l'évolution de la température du filament extrudé tout au long de la phase de fabrication. Mais il ne s'agit ici que d'un *Digital Shadow*, sans capacité d'action sur le monde physique.

La prochaine étape de ce travail de thèse va donc consister en la mise en place d'un *Digital Twin*, capable de contrôler le processus de fabrication à partir de cette observabilité du produit.

CHAPITRE 5.

...A UN SYSTEME CONTROLE PAR LE PRODUIT...

*Notre démarche de contrôle par le produit en temps réel à travers
l'utilisation d'un Digital Twin*



5.1 Introduction du chapitre 5

La création d'un Jumeau Numérique de la pièce fabriquée consisterait à créer un modèle de la pièce pendant sa fabrication, basé sur des données acquises sur la pièce à l'aide de capteurs, et à comparer ce modèle avec le modèle de pièce souhaité résultant de la phase de conception du processus de création. Cette méthode permettrait ainsi une comparaison en temps réel entre le modèle de conception et la pièce réelle, permettant au fabricant d'évaluer l'écart de la pièce par rapport au modèle et de décider si la pièce répond aux exigences établies. En cas de variation significative entre le modèle de conception et la pièce réelle, les commandes de la machine peuvent alors être mises à jour en temps réel pour corriger cette variation. Un modèle de ce Jumeau Numérique, introduit au chapitre précédent, est présenté Figure 25.

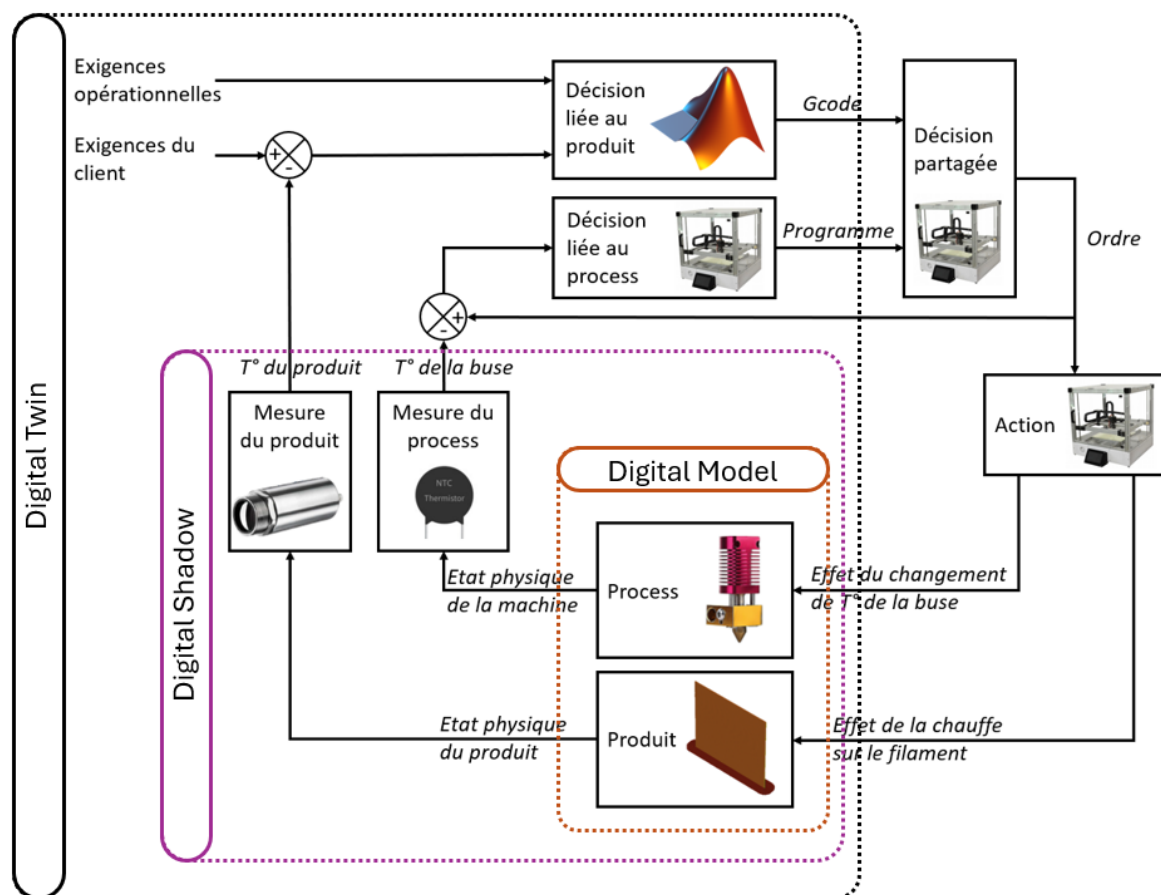


Figure 25 : Application d'un Jumeau Numérique au paradigme du système contrôlé par le produit en temps réel sur un processus de fabrication additive

Cependant, il n'est actuellement pas possible de corriger l'ensemble du Gcode⁸ de la machine à chaque observation de la pièce, il n'est donc pas possible d'effectuer cette opération en temps réel tout au long de la fabrication d'une pièce.

Cette partie de notre travail de recherche s'intéresse à la construction d'un contrôle d'un procédé de fabrication, ici une impression 3D FFF (Fused Filament Fabrication) d'un produit en fonction de l'état réel du produit fabriqué. Cet état est représenté par un ensemble de données mesurées, et notamment la température du filament extrudé en sortie de la buse l'imprimante 3D.

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment observer cette donnée en temps réel. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la seconde partie de la construction de notre asservissement, c'est-à-dire déterminer comment commander cette température du filament en fonction d'un état désiré du produit final.

En effet, la température du filament n'est pas une valeur directement commandée au sein du processus de fabrication additive classique. Il va être nécessaire d'établir un modèle, tout d'abord comportemental, de la température du filament en fonction de différents paramètres de fabrication accessibles via l'interface de l'imprimante 3D utilisée.

5.2 Détermination empirique d'un modèle de la température d'extrusion d'une imprimante 3D

L'objectif de cette étude est de réaliser un asservissement de la température du filament à la sortie de la buse d'une imprimante 3D. Pour ce faire, une modélisation précise du système est nécessaire afin de concevoir un contrôleur efficace. Cette partie détaille les étapes suivies pour identifier et modéliser le système, en se basant sur des données expérimentales recueillies à l'aide d'une caméra thermique.

⁸ Le G-code est un langage de programmation utilisé principalement pour contrôler les machines-outils à commande numérique (CNC) et les imprimantes 3D. Ce langage permet de spécifier les mouvements, les vitesses, les opérations d'usinage et d'autres fonctions que la machine doit effectuer. <https://reprap.org/wiki/G-code/fr>, mars 2024

5.2.1 Collecte des données expérimentales

La première étape consiste à collecter des données expérimentales sur la température d'extrusion. Pour cela, une série d'expériences est réalisée en faisant varier différents paramètres de l'imprimante 3D, tels que la vitesse d'extrusion, le débit du filament et les conditions ambiantes. Les données sont enregistrées en temps réel à l'aide de capteurs de température placés près de la buse d'extrusion.

D'après l'analyse menée au chapitre précédent, nous pouvons identifier quatre paramètres de fabrication qui ont potentiellement une influence sur la température du filament mesurée à la buse. Ces paramètres contrôlés sont les suivants :

- Température de consigne : entre 190°C et 230°C (recommandation fabricant pour le matériau utilisé) ;
- Vitesse d'extrusion : 2 à 50 mm/s (plage nominale de vitesse recommandée pour l'utilisation de l'imprimante 3D) ;
- Débit du filament : entre 95 et 105% (plage nominale recommandée pour l'utilisation de l'imprimante 3D) ;
- Vitesse du ventilateur : entre 0 et 100% (plage d'utilisation de l'imprimante 3D), codée sur 1 octet donc variant de 0 à 255.

D'autre part, deux sorties du système sont mesurées :

- Température de la buse : elle est mesurée via un thermocouple inséré dans le collier de chauffe de la buse. Elle est contrôlée par la température de consigne suivant une boucle fermée.
- Température du filament sortant de la buse : elle est mesurée, comme présenté dans le chapitre 4, par une caméra thermique.

Les données sont collectées à une fréquence de 0.1 Hz environ sur une période de plusieurs minutes pour couvrir une gamme représentative des conditions d'impression.

L'acquisition de ces données a été réalisé via un script présenté en Annexe 1. Un ordinateur, utilisé pour faire tourner le script, est relié à la caméra thermique afin de mesurer la température du filament en sortie de la buse et de recueillir ces informations. La température a été capturée dans une zone de plusieurs pixels (6 par 3) où la valeur maximale a été capturée lors de cette extrusion.

En parallèle, le script communique avec l'imprimante 3D utilisée via son port série pour lui envoyer des commandes des 4 paramètres d'entrée étudiés ici. Les mesures résultantes ont été réalisées en envoyant à l'imprimante une commande pour régler la température de l'extrudeuse (M104), le débit (M221) et le ventilateur de l'outil (M106) à la valeur souhaitée, puis une commande d'extrusion a été envoyée (G1) pour extruder le PLA à une certaine vitesse.

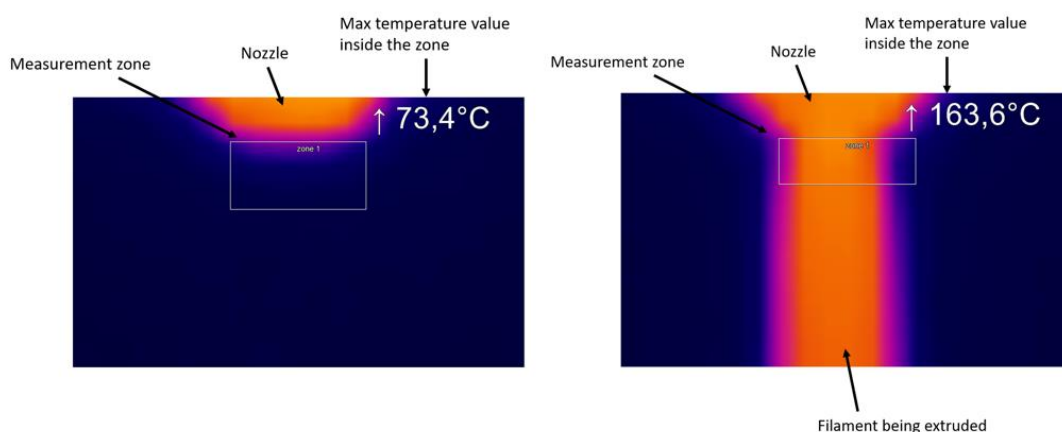


Figure 26 : Observation de la température du filament par la caméra thermique via le logiciel Optris

5.2.2 Identification d'un premier modèle statique linéaire

Le problème principal pour réaliser une identification est d'identifier le type de modèle qui représente le plus fidèlement le comportement du système étudié.

Une première approche de notre détermination empirique d'un modèle a consisté à étudier notre buse comme un système statique et linéaire, c'est-à-dire à extruder pendant un certain temps (ici 10s) un filament avec un ensemble de paramètres de fabrication fixés et d'établir une corrélation linéaire entre ces paramètres en entrée et la température du filament en sortie du modèle.

Pour identifier l'influence de ces paramètres sur la température du filament extrudé, un plan d'expérience a été réalisé. Dans un souci de réduire le nombre d'expériences tout en conservant une bonne précision et robustesse (Goupy, 2005), un plan factoriel fractionnaire 3^{4-1} basé sur un modèle de Box-Behnken a été réalisé. Il est présenté dans la table ci-dessous.

Exp No	Vitesse extrusion (mm/s)	Temp commande (°C)	Vitesse du ventilateur (%)	Débit (%)	Temp extrusion (°C)
1	10	200	0	95	158,6
2	20	200	0	105	158,9
3	10	220	0	105	172,4
4	20	220	0	95	171,1
5	10	200	100	105	156,6

6	20	200	100	95	157,1
7	10	220	100	95	168,8
8	20	220	100	105	167,7
9	10	200	0	95	158,2
10	15	210	50	100	163,8
11	15	210	50	100	163
12	15	210	50	100	162,7

Une fois les mesures terminées pour chaque ensemble de paramètres du plan factoriel fractionnaire, ce plan a été implémenté dans un logiciel de plan d'expériences, afin de déterminer si chaque facteur était significatif, et le modèle expérimental pour la température d'extrusion. Ces résultats sont présentés à la Figure 27.

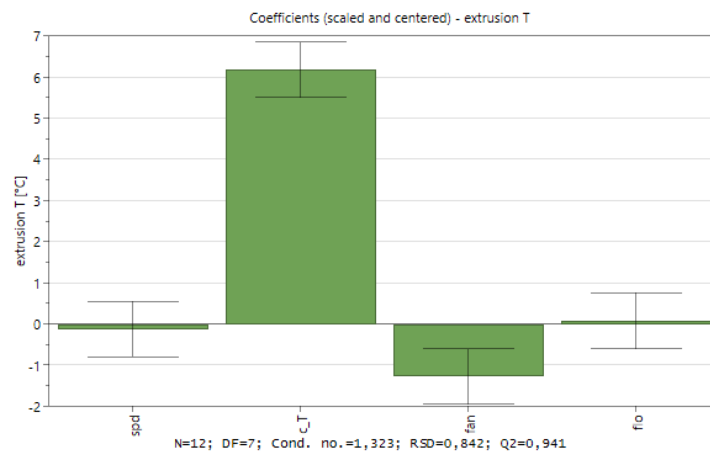


Figure 27 : représentation de l'influence des paramètres de fabrication sélectionnés sur la température du filament extrudé

Nous observons que la température de commande et la vitesse du ventilateur ont un impact important sur la température d'extrusion, alors que la vitesse d'extrusion et le débit n'ont pratiquement aucune influence sur la sortie du modèle. Ces résultats sont en accord avec les travaux issus de la littérature étudiant l'impact de différents paramètres d'impression sur la résistance mécanique de la pièce finie (Gao, Yu and Li, 2020; Vanaei *et al.*, 2020).

Cette première étude nous a permis de mettre en évidence les deux paramètres ayant une influence non négligeable sur la température en sortie de l'extrudeur. Néanmoins, ce modèle ne prend pas en compte les effets dynamiques, et il convient donc d'affiner notre modélisation, en se concentrant sur un modèle dynamique prenant en entrée la température de consigne et la vitesse du ventilateur, afin d'obtenir un modèle au plus près de la réalité physique du filament.

Synthèse

- L'objectif de cette étude est de réaliser un asservissement de la température du filament à la sortie de la buse d'une imprimante 3D. Cela nécessite une modélisation précise du système pour concevoir un contrôleur efficace. La modélisation est basée sur des données expérimentales recueillies à l'aide d'une caméra thermique.
- Pour identifier un modèle représentatif du système, une première approche consistait à étudier la buse comme un système statique et linéaire. Les résultats montrent que la **température de consigne** et la **vitesse du ventilateur** ont un impact significatif sur la température d'extrusion.
- La prochaine étape est de développer un modèle dynamique pour un contrôle plus précis.

5.3 Identification d'un modèle dynamique de la température du filament extrudé

L'objectif de cette partie a été de caractériser le comportement dynamique des températures de la buse d'impression et du filament extrudé, lors de la variation de ces deux paramètres d'impression.

Pour cela, une expérience a été menée, en faisant varier au cours du temps ces deux paramètres, et en mesurant d'une part la température de la buse et la température du filament au cours du temps. Pour garantir la précision des mesures, un prétraitement des données a été effectué. Les données brutes de température de la buse et du filament ont été lissées pour réduire le bruit de mesure.

5.3.1 Détermination du comportement de la buse de l'imprimante

On peut observer sur la Figure 28 l'évolution de la température de la buse en fonction des deux paramètres de fabrication. On remarque que la vitesse du ventilateur ne semble pas avoir d'influence significative sur cette dernière. La Figure 29 représente ainsi l'évolution de la température de la buse uniquement en fonction de la température de commande. On déterminera dans la suite de ce travail si ce paramètre a réellement ou non un effet significatif sur la température de la buse.

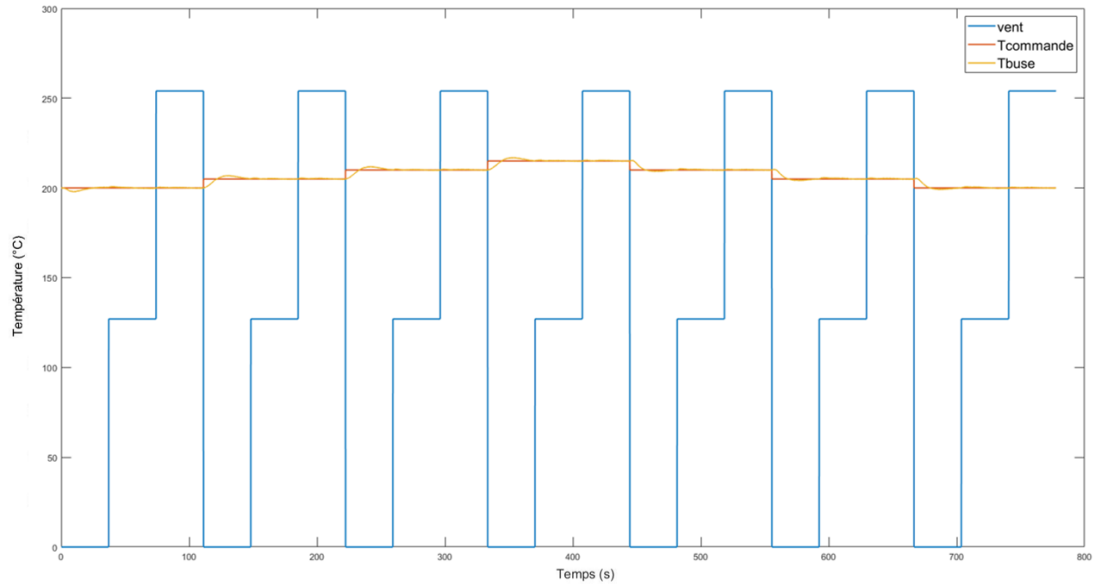


Figure 28 : Evolution de la vitesse du ventilateur (en bleu), de la température de commande de la buse (en rouge) et de la température réelle de la buse (en jaune) en fonction du temps

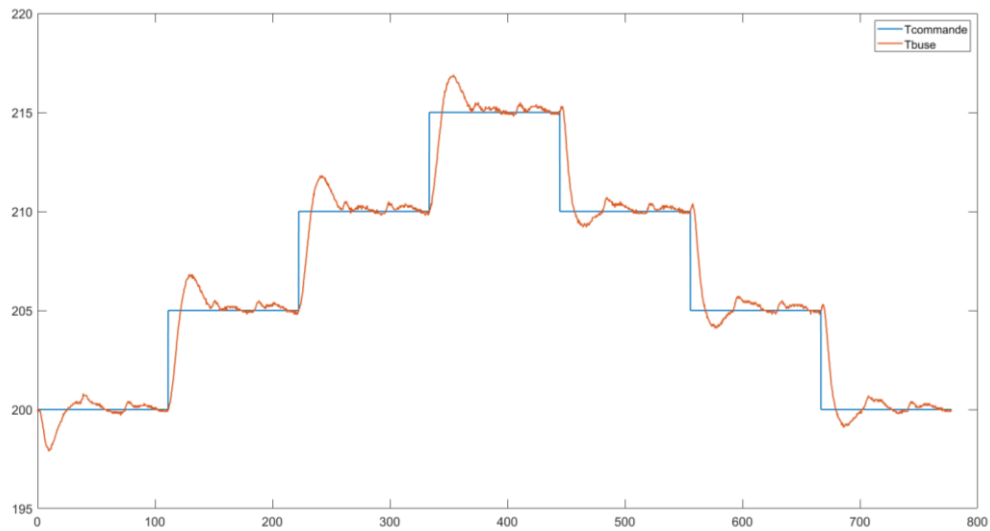


Figure 29 : Evolution de la température de commande de la buse (en bleu) et de la température réelle de la buse (en rouge) en fonction du temps

Les différents modèles thermiques existants dans la littérature pour représenter le comportement dynamique d'un système comme celui d'une buse d'impression (Mir-Nasiri, Ali and Kurokawa, 2015; Li, Cheng and Hu, 2018; Hutchinson *et al.*, 2024), sont en général des modèles du premier ordre. La fonction de transfert de ce type de modèle est de la forme :

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Avec K le gain statique, et τ la constante de temps du système.

Le comportement de la buse pourrait également être modélisé de manière plus fine de manière générale comme un système dynamique non-linéaire, mais nous choisissons ici de modéliser son comportement de manière linéaire autour de ses valeurs classiques de fonctionnement, car cela simplifie notre modèle tout en conservant une bonne précision (Mir-Nasiri, Ali and Kurokawa, 2015).

Or ici, on voit que le système ne se comporte pas comme un système du premier ordre, mais comme un système du second ordre, car la réponse indicielle du système présente un dépassement. Cela s'explique par le fait que l'imprimante utilise pour le contrôle de la température de la buse, un correcteur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé)⁹. La commande envoyée à l'imprimante n'est donc pas directement la commande fixée par l'utilisateur. On peut représenter la boucle de contrôle comme à la Figure 30 :

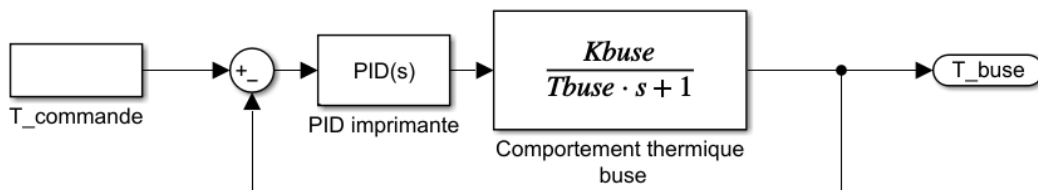


Figure 30 : Représentation de la modélisation du comportement thermique de la buse par un système du 1^{er} ordre

Une fois les valeurs des différents coefficients du correcteur PID de l'imprimante récupérées, on détermine par identification (ici par l'utilisation de la toolbox *System Identification* de Matlab, voir Annexe 2) les valeurs de K et τ pour le modèle du premier ordre de notre buse.

Cela nous permet ensuite de comparer le modèle obtenu de la buse avec l'évolution réelle de la température de la buse. Ce résultat est présenté à la Figure 31.

⁹ https://docs.duet3d.com/User_manual/Connecting_hardware/Heaters_tuning, mars 2024

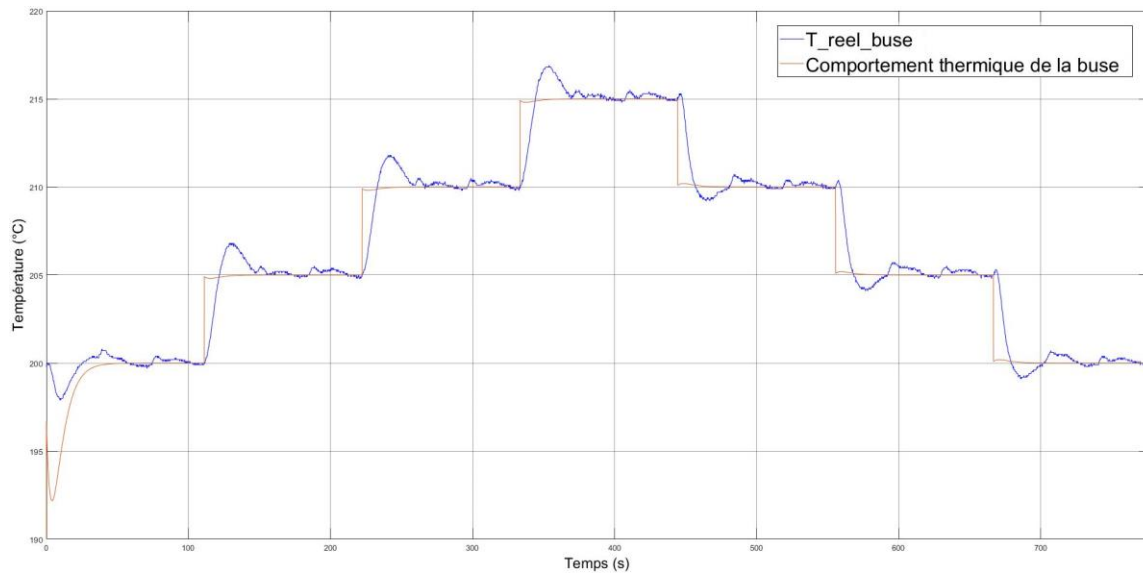


Figure 31 : Représentation du modèle de comportement de la buse (en bleu) et du système réel (en noir)

La qualité de l'identification a été évaluée en examinant les résidus et permet de conclure que notre modèle représente bien le comportement réel de la buse (Cette identification est détaillée dans l'Annexe 2 de ce manuscrit).

La modélisation du système a permis de capturer la dynamique de la relation entre la température de commande de la buse, la vitesse du ventilateur et la température de la buse. L'identification du modèle présenté Figure 30 a permis de démontrer que la vitesse du ventilateur n'avait pas d'influence significative sur la température de la buse, c'est pourquoi ce paramètre n'apparaît pas dans ce modèle.

5.3.2 Détermination du comportement du filament extrudé

Une fois ce premier modèle établi, on peut maintenant s'intéresser à la détermination du comportement thermique du filament extrudé. D'après notre analyse effectuée au chapitre précédent, et les différents paramètres que nous avons choisi de prendre en compte dans ce chapitre, on suppose que la température du filament extrudé va être influencée par la température de la buse, dont nous venons d'établir le modèle en fonction de la température de commande de la buse, et la vitesse de rotation du ventilateur.

Pour cela, nous allons reprendre la même méthode que celle utilisée dans la partie précédente, à savoir déterminer par identification l'ordre et la forme des modèles permettant de représenter acceptablement le système étudié.

On peut observer sur la Figure 32 l'évolution de la température du fil en fonction des deux entrées du système.

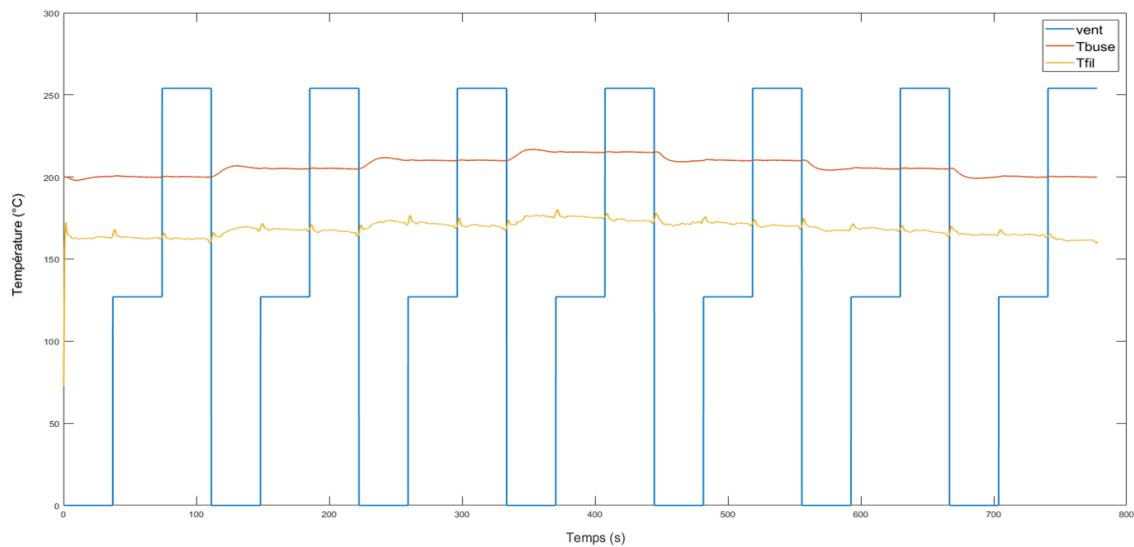


Figure 32 : Evolution de la vitesse du ventilateur (en bleu), de la température réelle de la buse (en rouge) et de la température du filament (en jaune) en fonction du temps

On peut observer sur cette figure que les deux entrées du système semblent exercer une influence significative sur la sortie du système. On détermine ensuite par identification l'ordre et les valeurs des modèles du système. Le résultat est présenté Figure 33. Les deux modèles peuvent être approchés de manière satisfaisante par des premiers ordres autour des points de fonctionnement moyens du système.

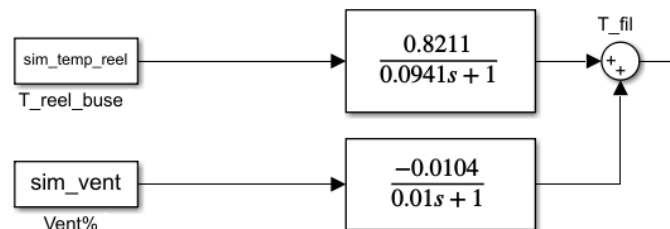


Figure 33 : Modèle du comportement thermique de la buse

On remarque que, comme on peut l'apercevoir sur la Figure 33, la température de la buse exerce une influence importante sur la température du fil (une variation de 1°C de température de la buse va entraîner une variation de $0,82^{\circ}\text{C}$ pour le filament extrudé). Cette valeur du gain explique également pourquoi la température du fil est significativement plus faible que la température de consigne de la buse, comme on a pu l'observer au chapitre précédent.

On remarque également que le ventilateur joue un rôle moindre pour le contrôle de la température, puisqu'il ne permet, sur toute sa plage de fonctionnement (de 0 à 100%, soit de 0 à 255, codé sur 8 bits), qu'une variation de $2,6^{\circ}\text{C}$ environ ($0,0104 \times 255 = 2,65^{\circ}\text{C}$). Malgré tout, sa constante de temps est bien plus faible que celle de la température de la buse, ce qui veut dire qu'une variation de la

vitesse du ventilateur va permettre une variation plus rapide de la sortie du système, la température du fil, qu'une variation de la température de la buse.

Il apparaît donc intéressant de réaliser un contrôle en se servant de ces deux entrées à la fois.

Encore une fois, il est important de comparer notre modèle à la réponse réelle du système, mesurée par la caméra thermique. Les résultats sont présentés Figure 34.

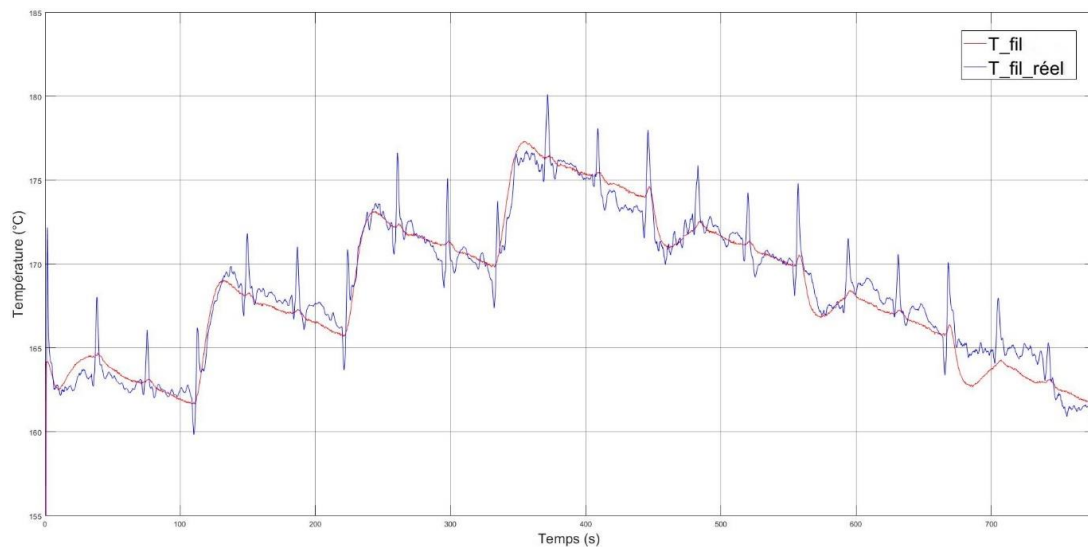


Figure 34 : Représentation de notre modèle de la température du filament (en rouge) et du système réel (en bleu)

La modélisation du système a permis de capturer la dynamique de la relation entre la température de la buse, la vitesse du ventilateur et la température du filament. Les modèles de première ordre identifiés reflètent adéquatement le comportement thermique du système et serviront de base pour la conception du contrôleur.

5.3.3 Détermination du modèle global du comportement de l'imprimante et du fil extrudé

Le modèle final du système, prenant comme entrée les paramètres machine, et comme sortie la température du filament, est représenté Figure 35.

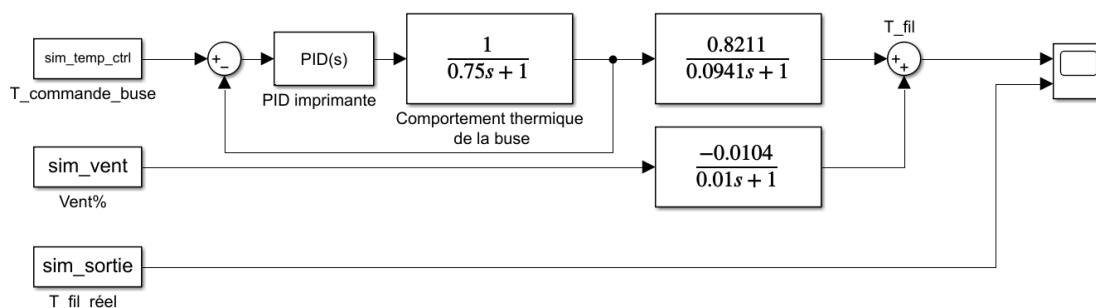


Figure 35 : Modèle du comportement thermique de l'imprimante 3D

On peut finalement comparer ce modèle global avec la température mesurée du filament. Ce résultat est présenté Figure 36. Notre modélisation comportementale approche le comportement réel de l'imprimante, nous allons donc pouvoir nous en servir dans la suite de ce chapitre pour en déduire un asservissement de l'imprimante basé sur l'état du produit.

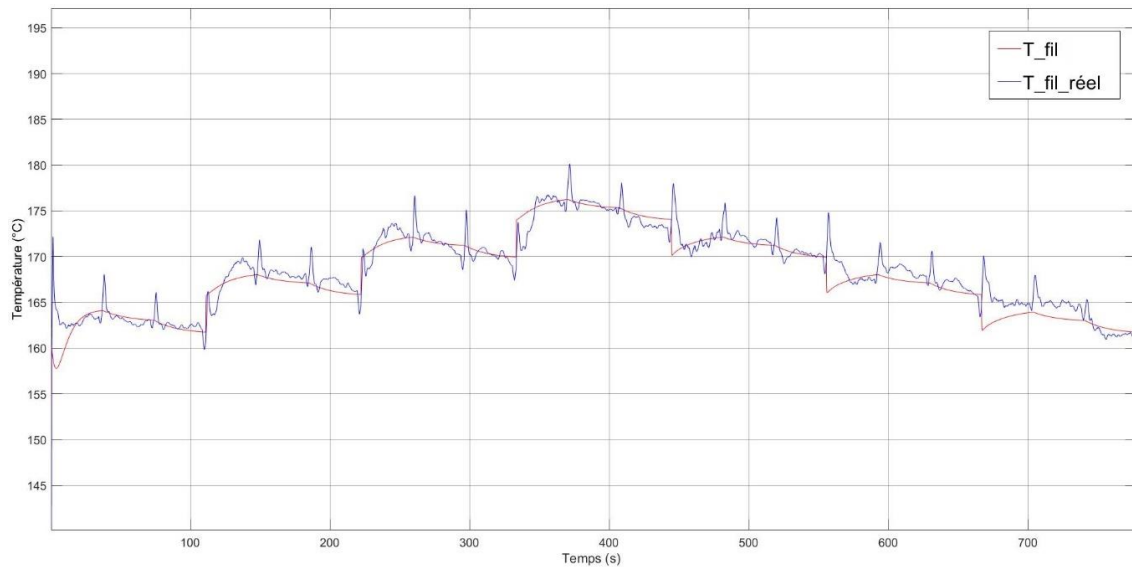


Figure 36 : Représentation du modèle de comportement de l'imprimante (en rouge) et du système réel (en bleu)

Les prochaines étapes de ce chapitre consisteront à utiliser ce modèle pour concevoir un contrôleur PID capable de maintenir la température du filament à une valeur optimale en temps réel.

Synthèse

- Cette sous-partie vise à caractériser le comportement dynamique des températures de la buse d'impression et du filament extrudé lors de la variation de la température de consigne et de la vitesse du ventilateur. Pour ce faire, une expérimentation a été menée où ces paramètres ont été modifiés au cours du temps, et les températures de la buse et du filament ont été mesurées.
- Cette modélisation linéaire a capturé les dynamiques entre la température de la buse, la vitesse du ventilateur, et la température du filament. Ces modèles seront utilisés pour créer un contrôleur PID pour optimiser la température du filament en temps réel.

5.4 Implémentation d'un système de contrôle en temps réel de la température d'extrusion de l'imprimante 3D

Suite à l'identification du modèle de la température d'extrusion, cette partie se concentre sur l'intégration du modèle dans un système de contrôle en temps réel. L'objectif est de réguler efficacement la température d'extrusion de l'imprimante 3D. Le système de contrôle développé permettra d'améliorer la précision et la qualité des impressions en maintenant la température d'extrusion à un niveau optimal.

5.4.1 Architecture du système de contrôle

Dans cette sous-partie, nous détaillons l'architecture du système de contrôle en temps réel conçu pour réguler la température d'extrusion d'une imprimante 3D. Ce système intègre les composants matériels et logiciels nécessaires pour assurer une communication bidirectionnelle entre l'ordinateur utilisé pour le contrôle et l'imprimante 3D, permettant ainsi un contrôle précis et dynamique de la température.

Le système de contrôle en temps réel se compose de trois éléments :

1. L'imprimante 3D utilisée dans cette étude est équipée de :
 - **Capteur de Température** : Capteur thermique placé près de la buse d'extrusion pour mesurer la température en temps réel.
 - **Microcontrôleur** : Un microcontrôleur gère la communication série avec l'ordinateur et contrôle le chauffage de la buse en fonction des commandes reçues.
2. La communication série est établie entre l'ordinateur et l'imprimante 3D, permettant l'échange bidirectionnel de données. Cette interface utilise le port série de l'imprimante pour envoyer des commandes de contrôle et recevoir les données de température de l'imprimante.
3. L'ordinateur exécute Matlab, qui est utilisé pour :
 - **Acquisition de Données** : Les capteurs de température de l'imprimante envoient des lectures au microcontrôleur, qui les transmet à Matlab via le port série.
 - **Traitement des Données** : Matlab utilise le modèle validé pour traiter les lectures de température et déterminer les ajustements nécessaires.

- **Commande de Contrôle** : Matlab envoie des commandes de température au microcontrôleur, qui ajuste l'élément chauffant de la buse d'extrusion et le ventilateur.

Les données de température acquises sont ensuite enregistrées pour une analyse postérieure. Cela permet d'évaluer la performance du système de contrôle et d'ajuster les paramètres si nécessaire.

5.4.2 Implémentation du contrôleur

Après avoir validé le modèle de température d'extrusion, nous procédons à la conception d'un contrôleur en temps réel. Le choix d'un contrôleur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) est motivé par sa simplicité et son efficacité pour de nombreux systèmes industriels. Le contrôleur PID ajuste la température d'extrusion en fonction de l'erreur entre la température de consigne et la température mesurée (Long, 2023; Zhou *et al.*, 2024). Les gains proportionnel (K_p), intégral (K_i) et dérivé (K_d) sont déterminés en fonction du modèle identifié précédemment. Le contrôleur PID calcule la commande de contrôle en utilisant les composantes proportionnelle, intégrale et dérivée de l'erreur. L'identification paramétrique est essentielle pour assurer une réponse adéquate du système. Cela peut être fait manuellement ou en utilisant des techniques d'optimisation automatique telles que la méthode de Ziegler-Nichols par exemple (Irshad and Ali, 2018; Zhou *et al.*, 2024), comme cela a été le cas ici.

La boucle de contrôle en temps réel implique la lecture continue de la température, le calcul de la commande de contrôle et l'envoi de cette commande à l'imprimante 3D via le port série (le code Matlab présent en annexe présente l'implémentation de cette boucle).

Pour chacune des deux entrées de mon système, une boucle de contrôle constituée d'un PID va ainsi être construite. Ensuite, un algorithme d'optimisation va permettre de minimiser la variation des paramètres d'entrée pour contrôler la température de sortie.

Un premier PID, présenté Figure 37, est ainsi défini pour le contrôle de la température de commande de la buse, en fixant des valeurs des paramètres de départ classiques ($T_{commande_buse} = 210^{\circ}C$ et $T_{commande_fil} = 176^{\circ}C$).

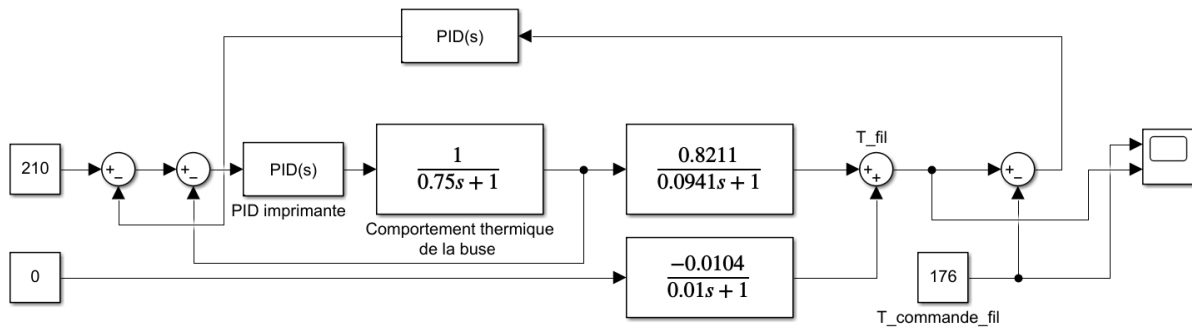


Figure 37 : Implémentation d'un PID pour la commande de la buse

Un second PID, présenté Figure 38, est également défini pour le contrôle de la vitesse du ventilateur.

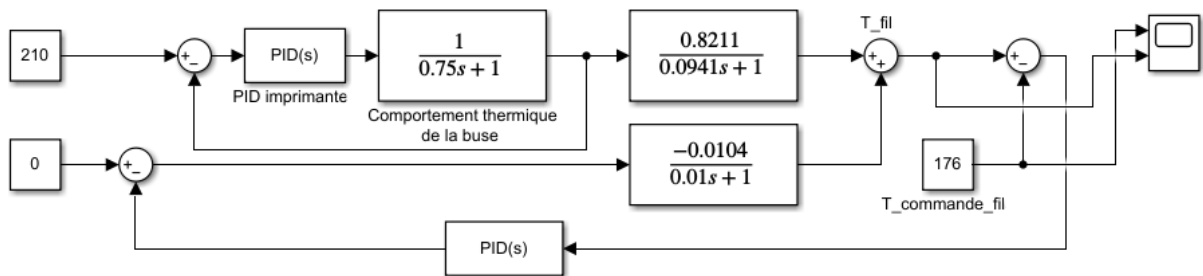


Figure 38 : Implémentation d'un PID pour la commande du ventilateur

Une fois l'identification paramétrique effectuée pour ces deux PID, nous disposons maintenant de deux boucles de contrôle potentielles. Nous pourrions décider de choisir l'une ou l'autre de ces boucles de contrôle et l'implémenter. Néanmoins, chacune de ces boucles possède un inconvénient qui nous incite à privilégier un contrôle multi-paramètres :

- Contrôler le système uniquement par la vitesse du ventilateur limite la plage d'utilisation de notre boucle de contrôle. En effet, la vitesse du ventilateur ne peut varier que de 0 à 100%, ce qui limite la correction qui peut être apportée à la température du fil extrudé.

Ainsi, pour une température objectif du fil $T_{commande_fil} = 176^{\circ}C$ et une température de commande de la buse $T_{commande_buse} = 210^{\circ}C$, si on limite les valeurs que peut prendre le ventilateur entre 0 et 100%, on ne peut jamais atteindre la température de consigne car il faudrait que la vitesse du ventilateur prenne des valeurs négatives. Ce résultat est présenté à la Figure 39.

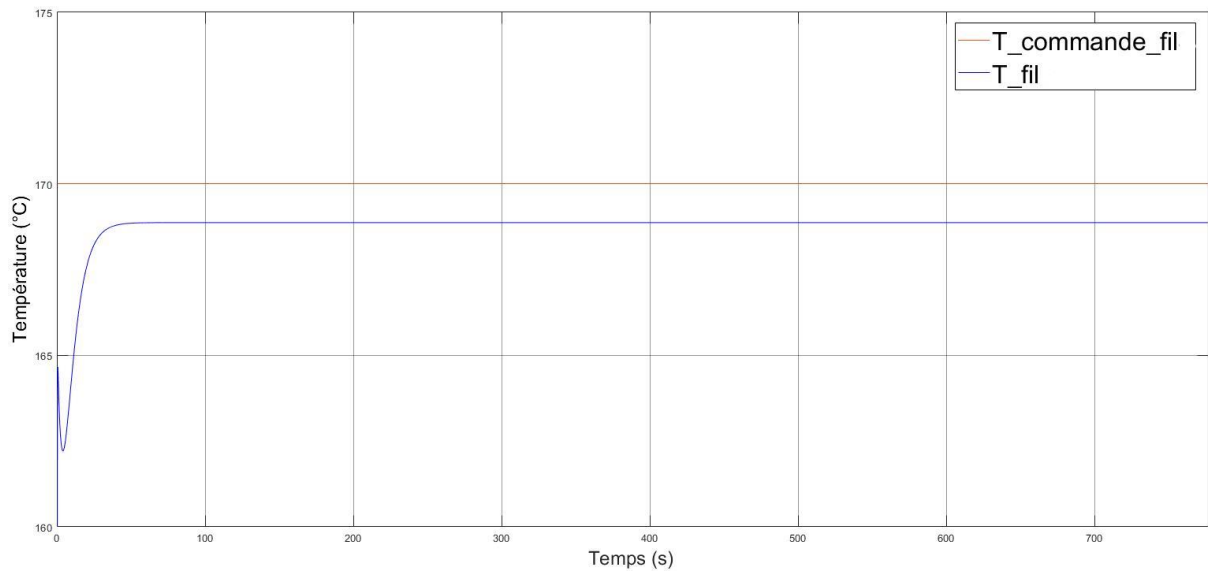


Figure 39 : Représentation d'un contrôle uniquement par une commande du ventilateur, pour une consigne de température trop élevée

- Contrôler le système uniquement par la température de commande de la buse prend beaucoup de temps, à cause de l'inertie thermique de celle-ci.

Ainsi, il apparaît nécessaire de privilégier un contrôle multi-paramètres, dont l'implémentation va être présentée dans la sous-partie suivante.

5.4.3 Optimisation d'un contrôle multi paramètres

L'objectif de cette partie est de déterminer une commande optimale multi-paramètres de la température du fil extrudé, qui permette un contrôle rapide minimisant la variation des paramètres d'entrée du système par rapport à leur valeur antérieure.

L'idée retenue ici est de déterminer un ensemble de couples de valeurs $\{T_{commande_buse}, Vent\%$ qui permettent d'atteindre la température du fil désirée $T_{commande_fil}$. On fixera bien sûr des limites hautes et basses pour ces paramètres, en fonction des contraintes machines.

Ensuite, on cherche à déterminer parmi les couples $\{T_{commande_buse}, Vent\%$, lequel va être le plus proche de la commande actuelle, afin d'atteindre la température du fil désirée $T_{commande_fil}$ en modifiant au minimum l'état actuel du système. (Voir la fonction `optim_3D.m`, annexe 3)

Puisque la commande du ventilateur est beaucoup plus réactive que celle de la buse, on va en réalité d'abord minimiser la variation de $T_{commande_buse}$, puis de $Vent\%$. (Voir la fonction `objective_3D.m`, annexe 3)

Ainsi, une représentation du résultat de cet algorithme est présentée ci-dessous à la Figure 40. Sur cette figure, on peut observer la commande de température de la buse $T_{commande_buse}$ (en bleu) et la commande de vitesse du ventilateur $Vent\%$ (en orange) en fonction de la différence de température entre la température réelle de la buse et la température désirée $T_{commande_fil}$. Ici la vitesse initiale du ventilateur était fixée à 50%, donc la plage de variation (sur 8 bits) est $[-127 ; 127]$.

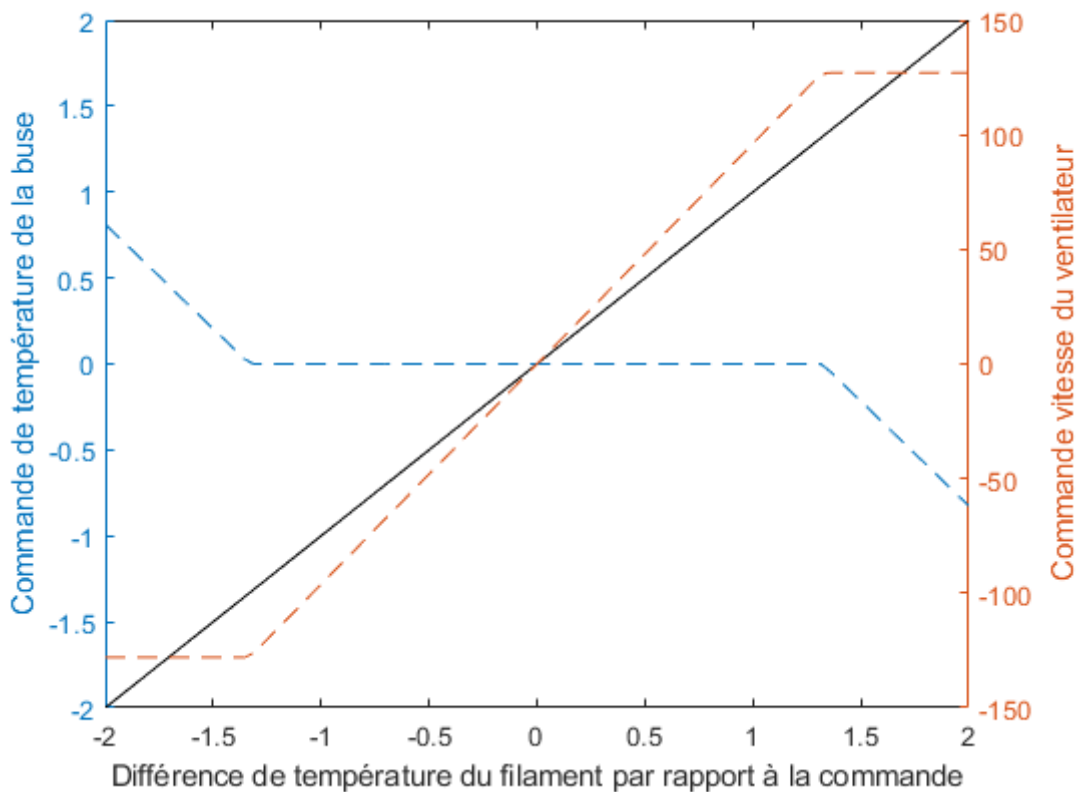


Figure 40 : Evolution de la commande de température de la buse (en bleu) et de la vitesse du ventilateur (en orange) en fonction de la différence de température du filament par rapport à la commande (en noir)

On peut voir sur cette figure que, pour de faibles écarts de température entre la commande et la réalité (plus ou moins 1,3°C), seule la commande du ventilateur va varier, alors que pour des variations plus importantes, la commande de température de la buse va être elle aussi impactée.

La prochaine partie de ce chapitre va présenter l'application du contrôle théorisé jusqu'ici.

Ce qu'il faut retenir de l'implémentation d'un système de contrôle en temps réel de la température d'extrusion

- Cette section se concentre sur l'intégration du modèle de température d'extrusion dans un système de contrôle en temps réel, visant à réguler efficacement la température d'extrusion de l'imprimante 3D pour améliorer la précision et la qualité des impressions.

- Pour le contrôle de la température, un contrôleur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) est conçu pour ajuster la température d'extrusion en fonction de l'écart entre la température de consigne et la température mesurée.
- Cependant, un contrôle multi-paramètres est nécessaire pour pallier les limitations de chaque boucle PID individuelle. Le contrôle par la vitesse du ventilateur est limité par sa plage de fonctionnement (0 à 100%), tandis que le contrôle par la température de la buse est lent en raison de l'inertie thermique de celle-ci. Un algorithme d'optimisation détermine les couples de valeurs {Tcommande_buse, Vent%} pour atteindre la température désirée du filament, minimisant les variations par rapport à l'état actuel du système.

5.5 Application du contrôle en temps réel pour la commande de l'imprimante 3D par le produit

En se servant des outils mis en place au chapitre précédent pour l'observation du produit, et du processus d'asservissement construit dans ce chapitre, cette partie va présenter l'application du Jumeau Numérique pour le paradigme du Système Contrôlé par le Produit, appliqué à une pièce fabriquée par impression 3D FFF.

5.5.1 Construction de l'algorithme d'asservissement en temps réel de l'imprimante centré sur le produit

Dans cette section, nous allons utiliser le modèle d'asservissement que nous avons établi dans les parties précédentes du chapitre pour contrôler notre impression 3D. Pour ce faire, nous développerons un script qui mettra en œuvre ce modèle d'asservissement.

L'objectif est d'utiliser notre modèle pour ajuster en temps réel les paramètres de l'imprimante 3D, afin d'assurer une impression précise et de haute qualité. Ce contrôle permet de corriger les erreurs et de maintenir les performances de l'imprimante à un niveau optimal.

Le modèle d'asservissement consiste en une boucle de rétroaction qui ajuste les actions de l'imprimante en fonction des erreurs détectées. Ce modèle inclut :

- Un capteur : Pour mesurer la température du filament extrudé ;
- Un contrôleur : Pour traiter les données acquises et calculer les corrections nécessaires ;

- Deux actionneurs : Pour appliquer les corrections de température de la buse et la vitesse du ventilateur.

Ce modèle d'asservissement, présenté à la Figure 41, a été dans notre cas développé sous Matlab, et son fonctionnement détaillé est présenté en Annexe 3.

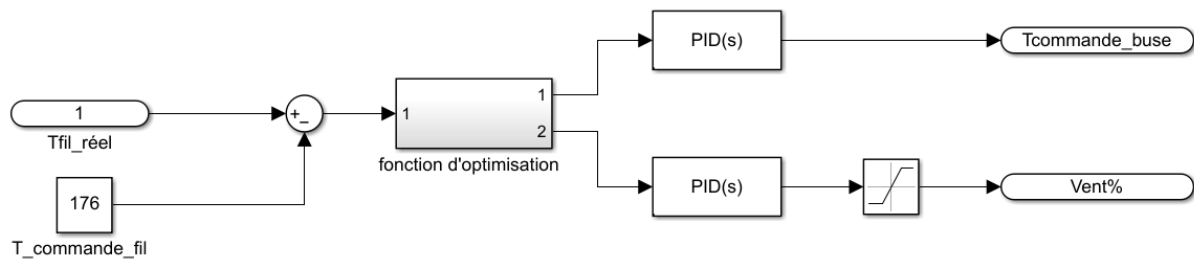


Figure 41 : Représentation de la boucle de contrôle en temps réel de l'imprimante 3D par le produit

Pendant toute la durée de fabrication de la pièce, le script enregistre la température du fil $T_{fil_réel}$, la commande de température de la buse $T_{commande_buse}$, la commande de vitesse du ventilateur $Vent\%$, la température réelle de la buse $T_{buse_réel}$, et la température désirée $T_{commande_fil}$.

Un autre script a également été développé à partir de ce script d'asservissement, en y ôtant toute partie de commande. Il va simplement permettre le même recueil de données que le script d'asservissement pour une pièce non contrôlée, afin de comparer notre asservissement à une pièce témoin.

L'imprimante est donc contrôlée à travers 3 PID : un PID interne à l'imprimante, et deux résultant de l'observabilité et de l'action du produit. Le schéma complet de l'asservissement de l'imprimante par le produit est présenté à la Figure 42.

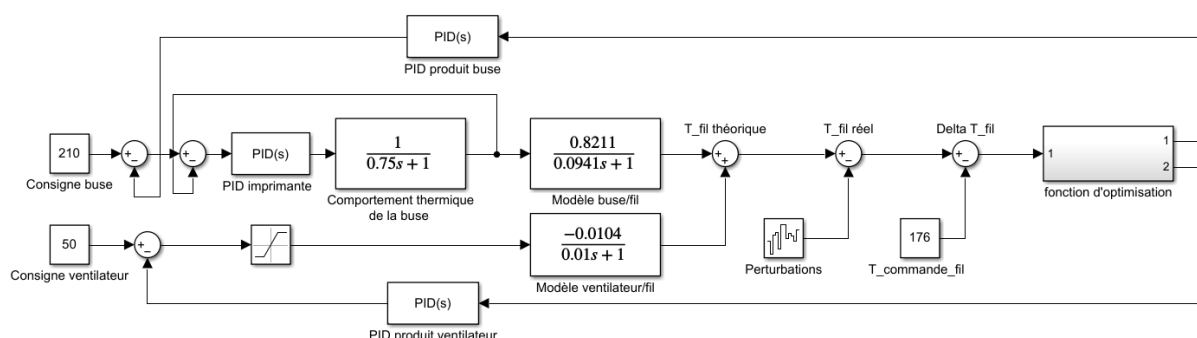


Figure 42 : Représentation de l'asservissement en temps réel de l'imprimante 3D par le produit

5.5.2 Résultats

Nous avons appliqué notre asservissement au « wall » présenté dans les chapitres précédents. La pièce est à l'origine imprimée avec une température de la buse fixée à 210°C et une vitesse du ventilateur réglée à 50% pour toute l'impression.

Nos résultats démontrent que le contrôle amélioré de la température conduit à une qualité de surface supérieure sur les pièces imprimées. En observant la surface des pièces, nous constatons une réduction significative des défauts tels que les stries et les irrégularités, ce qui indique une meilleure uniformité de l'impression.

5.5.2.1 Visualisation de l'état de surface

La Figure 43 est une photographie d'une pièce pour laquelle le contrôle a été déclenché au bout d'un tiers de l'impression. La partie basse de la pièce correspond à une impression sans contrôle, la partie haute à une impression contrôlée par le produit, avec une consigne de température du filament extrudé de 176°C.



Figure 43 : Photographie d'un « wall » pour lequel la partie basse a été imprimée sans contrôle, et la partie haute avec contrôle par le produit

Sur la partie non contrôlée de la pièce, on peut apercevoir plusieurs types de défauts d'impression :

- Suralimentation : Si la température est trop élevée, le filament peut devenir trop liquide, ce qui entraîne une suralimentation et la formation de bavures.

- Défauts de surface : Des fluctuations de température peuvent entraîner des variations dans l'épaisseur et l'uniformité des couches déposées, créant des irrégularités sur la surface de la pièce imprimée.

Ici, ces défauts peuvent en partie être dus au filament utilisé, qui était pourtant imprimé en suivant les recommandations du fabricant, mais qui, à force d'exposition à l'air et à la lumière, peut devenir plus poreux et perdre en qualité. Cela peut également s'expliquer par le fait que la température de la couche inférieure déjà déposée ne refroidit pas uniformément (le centre met plus de temps à refroidir), ce qui influe sur la température du filament pendant sa déposition.

L'amélioration de l'état de surface sur la partie supérieure de la pièce peut être directement attribuée à une régulation plus précise de la température. Lorsque la température est maintenue de manière optimale, le matériau fond et se dépose plus uniformément, ce qui réduit les variations de la surface imprimée.

5.5.2.2 Répartition de la température

Pour évaluer quantitativement l'effet de notre modèle d'asservissement sur le contrôle de la température, nous avons analysé la répartition de la température tout au long du processus d'impression. Cette analyse a été réalisée à l'aide de diagrammes de boîtes à moustaches (ou diagrammes de boîte), qui permettent de visualiser les statistiques descriptives clés des données de température.

Les boîtes à moustaches présentées Figure 44 montrent que l'asservissement réalisé permet une meilleure précision du contrôle de la température. On peut constater ainsi une diminution des variations de température du filament significatives entre la pièce fabriquée sans contrôle et celle contrôlée : les quartiles (écart de 2,1°C pour l'impression non contrôlée, contre 1,3°C pour l'impression contrôlée par le produit) et les extrêmes (8°C contre 5,1°C) sont plus resserrés, ce qui indique que les fluctuations de température sont réduites. Cela se traduit par une impression plus stable et prévisible, améliorant ainsi la qualité finale de la pièce imprimée.

D'après ces résultats, on peut dire que l'asservissement utilisé permet de réduire de manière significative la dispersion de la température de la buse pendant l'impression.

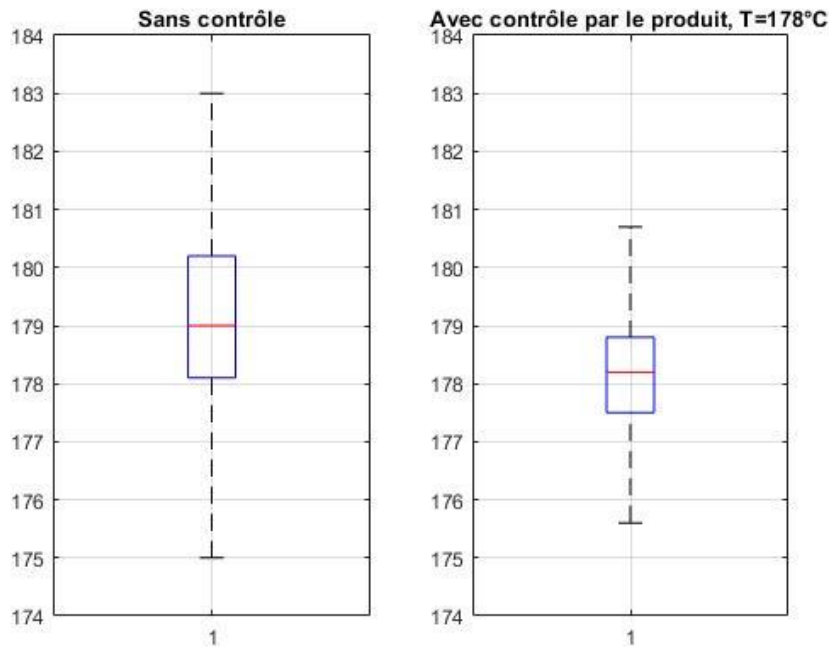


Figure 44 : Représentation en boîtes à moustache des variations de température lors de l'impression d'un « wall », avec et sans contrôle par le produit

D'autre part, on peut voir que pour une commande de 178°C pour le fil extrudé, notre contrôle a un résultat très proche, avec une médiane des températures du filament à 178,2°C. Ce résultat est très satisfaisant, cela indique que notre système de contrôle est capable de maintenir la température à un niveau souhaité de manière précise et cohérente.

5.5.2.3 Essais avec des pièces à longueur de couches non constantes

Notre premier résultat, présenté ci-dessus, a été obtenu pour un « wall » rectangulaire, pour lequel la longueur de chaque couche de matière est la même, et par conséquent le temps d'impression de chaque couche est également le même. Cela implique également que le temps de refroidissement pour une couche est constant, et une fois le régime permanent atteint, on doit avoir une température « constante » du filament en sortie.

Nous nous sommes alors demandé ce qui se passerait si l'on imprimait désormais une pièce de type « wall » mais avec une longueur de couche non constante, comme un trapèze.

Nous avons donc imprimé une pièce trapézoïdale, donc une représentation dans un slicer est présentée Figure 45.

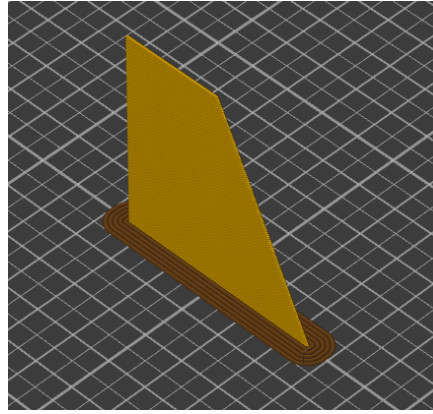


Figure 45 : Aperçu dans un slicer du fichier .STL du « wall » trapézoïdal utilisé pour nos expérimentations

Pour cette pièce, nous avons observé l'évolution de la température du filament extrudé tout au long d'une impression, d'abord sans contrôle par le produit, puis avec notre algorithme de contrôle par le produit.

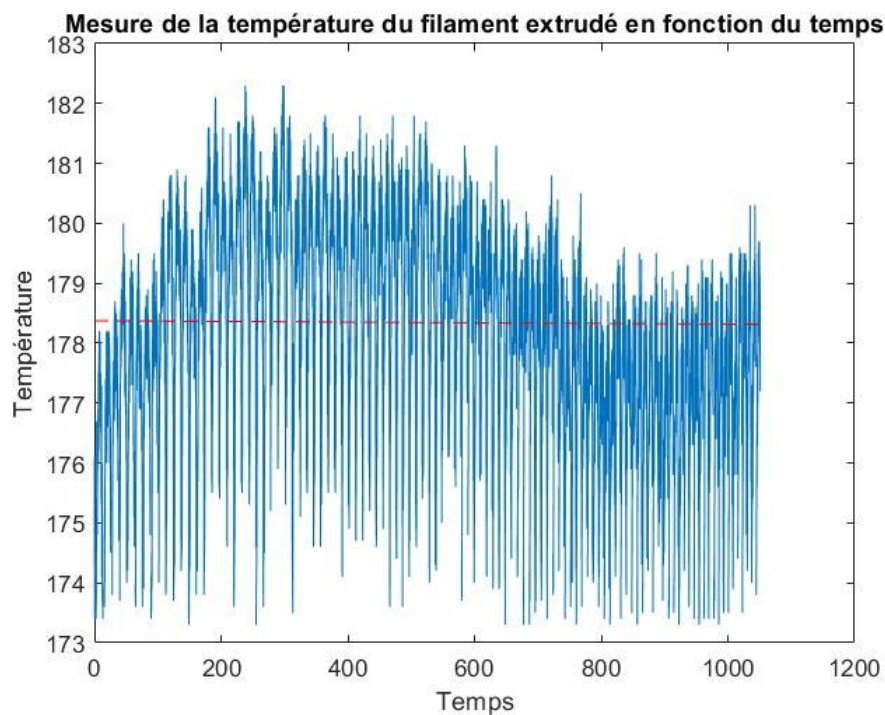


Figure 46 : Mesure de la température du filament en fonction du temps pour un "wall" trapézoïdal, sans contrôle

Sur la Figure 46, nous pouvons remarquer une fluctuation importante de la température tout au long de l'impression, due au changement de longueur de couche et donc à la température de la couche inférieure au moment du dépôt du filament.

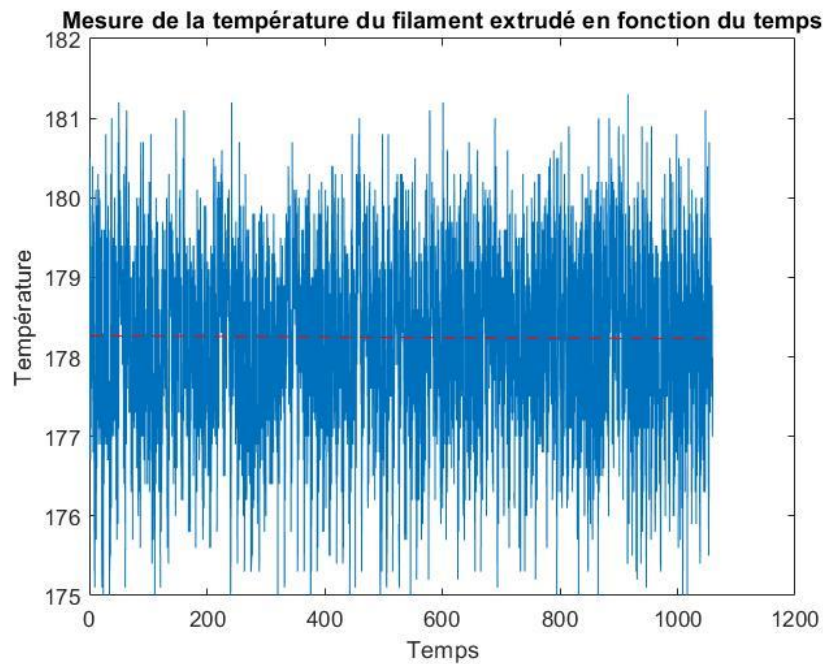


Figure 47 : Mesure de la température du filament en fonction du temps pour un "wall" trapézoïdal, avec contrôle

On peut apercevoir sur la Figure 47 que la distribution de température se fait sur une plage de valeurs qui paraît plus restreinte que pour son homologue non contrôlée, mais surtout on voit qu'il n'y a pas de fluctuation de température moyenne au cours de l'impression, comme on a pu le constater à la figure précédente. Nous avons, de la même manière que dans la sous-partie précédente, évalué cette distribution formellement à l'aide de diagrammes de boîtes.

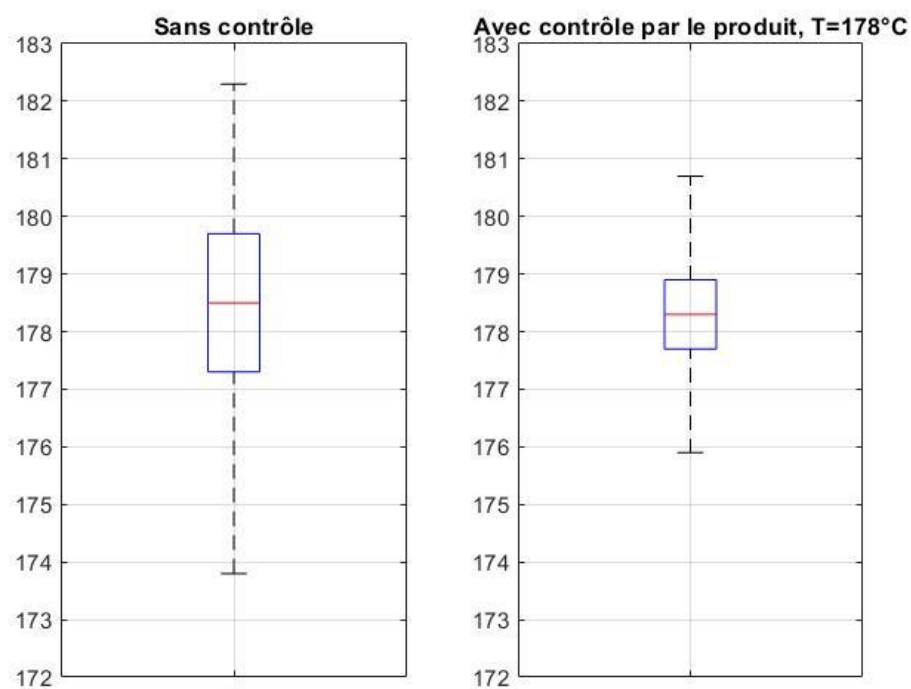


Figure 48 : Représentation en boîtes à moustache des variations de température lors de l'impression d'un « wall » trapézoïdal, avec et sans contrôle par le produit

Ces boîtes à moustaches présentées Figure 48 montrent que l'asservissement réalisé permet une meilleure précision du contrôle de la température. On peut constater ainsi une diminution des variations de température du filament significatives entre la pièce fabriquée sans contrôle et celle contrôlée : les quartiles (écart de 2.4°C pour l'impression non contrôlée, contre 1,2°C pour l'impression contrôlée par le produit) et les extrêmes (8.5°C contre 4,8°C) sont plus resserrés, ce qui indique une distribution des valeurs de températures en sortie de la buse sur une plage de valeurs deux fois plus faible pour une impression contrôlée, par rapport à son pendant non contrôlée.

On retrouve des résultats assez similaires pour les distributions de température du filament pour les pièces contrôlées (wall et trapèze), mais on remarque une distribution sur une plage plus importante pour une pièce trapézoïdale non contrôlée par rapport à un « wall » rectangulaire non contrôlé. Cela montre l'intérêt du contrôle par le produit pour l'impression 3D. En effet, dans la pratique, la majorité des pièces fabriquées par impression 3D sont des pièces complexes, avec un ensemble de couches de matière de temps d'impression inégales. Cela va créer des disparités importantes dans la température du filament extrudé tout au long de l'impression, ce qui justifie l'application du SCP à ce contexte pour garantir une résistance mécanique uniforme dans la pièce finie.

Ce qu'il faut retenir de l'application du contrôle en temps réel pour la commande de l'imprimante 3D par le produit

- Cette partie applique le concept du Système Contrôlé par le Produit (SCP) à une pièce imprimée en 3D. À l'aide d'un modèle d'asservissement développé précédemment et d'un script Matlab, nous ajustons en temps réel les paramètres de l'imprimante 3D pour améliorer la précision et la qualité des impressions.
- L'asservissement utilise trois PID, dont un interne à l'imprimante et deux issus de notre modèle. Les résultats montrent une réduction des défauts de surface et une meilleure uniformité d'impression, illustrés par des comparaisons visuelles et des analyses de données de température.
- Cette approche permet de maintenir la température du filament de manière stable, même lors d'impressions avec des variations de longueur de couche, montrant ainsi l'efficacité du SCP pour garantir une qualité constante dans les applications d'impression 3D.

5.6 Perspectives

Dans cette section, nous explorerons les perspectives du contrôle par le produit d'une imprimante 3D. Nous débuterons par une analyse des différents modèles de contrôle utilisés, avec une attention particulière portée à la commande sans modèle. Ensuite, nous nous pencherons sur les méthodes de contrôle spécifiques aux pièces en trois dimensions, en examinant les défis et les innovations associés à cette technologie.

5.6.1 Modèles complexes et commande sans modèle

Dans ce chapitre, nous avons approché le comportement de l'imprimante 3D par un ensemble de systèmes du premier ordre. Bien que ces modèles de premier ordre soient satisfaisants, il serait intéressant d'explorer des modèles non-linéaires pour capturer des comportements plus complexes du système, notamment lors de variations rapides de température.

En ce sens, nous souhaitons également explorer l'utilisation de contrôleurs avancés tels que la Commande Sans Modèle (CSM) pour voir comment ces outils pourraient améliorer la stabilité et la performance du système de contrôle en temps réel.

En effet, un problème actuel de notre contrôle est qu'il nécessite un modèle de l'imprimante, utilisé afin de calculer la commande des deux paramètres contrôlés de l'imprimante : la température de la buse et la vitesse du ventilateur. C'est problématique dans notre cas car on voudrait pouvoir contrôler la fabrication du produit de manière similaire sur n'importe quelle machine, sans avoir à déterminer empiriquement un modèle de la machine pour pouvoir effectuer ce contrôle. Dans ce contexte, la commande sans modèle (CSM) (Fliess and Join, 2009, 2013) se présente comme une solution astucieuse pour se débarrasser du modèle machine, tout en rendant le contrôle plus robuste face à des perturbations inattendues.

Une manière d'aborder l'implémentation de cette commande sans modèle serait par exemple de commander uniquement le ventilateur en fonction de l'écart de température du filament, puis de contrôler la température de la buse en fonction de l'écart entre la vitesse du filament et une vitesse objectif du filament, fixée par exemple à 50%, de façon à permettre une réactivité maximale du ventilateur en cas de perturbation. Avec l'emploi d'une telle commande, il n'est plus nécessaire d'avoir accès au modèle de l'imprimante, ce qui permet de transposer notre Jumeau Numérique à n'importe quelle imprimante sans modifications. Une représentation de cette commande sans modèle est présentée Figure 49.

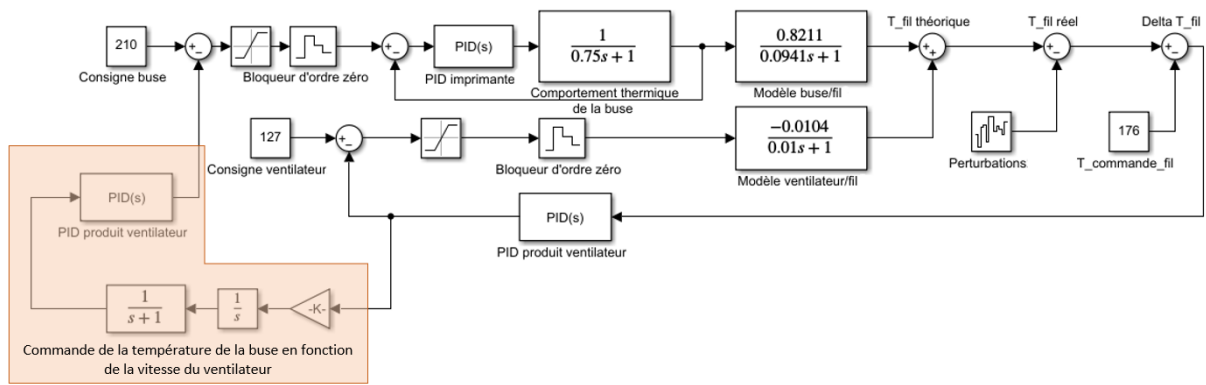


Figure 49 : Représentation d'une commande sans modèle de l'imprimante 3D par le produit

Ainsi, notre démarche de conception définie au chapitre 3 se retrouve légèrement modifiée, comme on peut le voir sur la Figure 50.

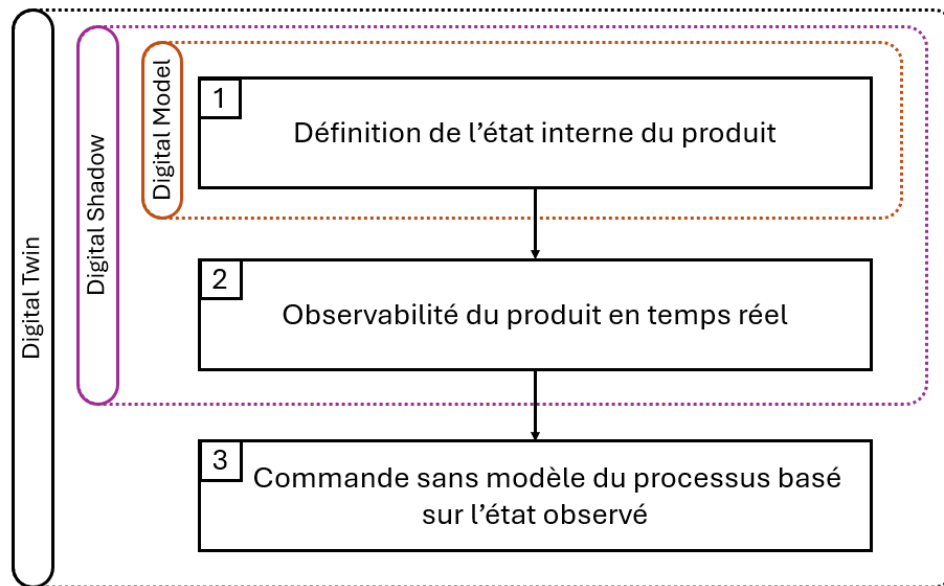


Figure 50 : Notre démarche de conception d'un Jumeau Numérique pour le paradigme du SCP, adaptée à une commande sans modèle

Ce passage à une commande sans modèle représente une perspective de recherche que nous avons commencé à explorer.

5.6.2 Application au contrôle pour des pièces en 3 dimensions

Jusqu'ici, nos travaux se sont consacrés à la réalisation de pièces imprimées en deux dimensions uniquement, car le positionnement de la caméra thermique sur notre imprimante empêche la mesure de la température du filament lors de sa disposition si une partie de la couche actuelle d'impression se situe entre la caméra et le filament extrudé.

Or, la plupart des « *patterns* » d'impression¹⁰ utilisés par les différents « *slicer* » les plus courants (OrcaSlicer, Cura, ...¹¹) décomposent une couche d'impression en 2 étapes :

- La coque : il s'agit de la partie externe de la pièce, qui est imprimée en premier. Elle est composée d'une à plusieurs couches, imprimées de l'extérieur vers l'intérieur.
- Le remplissage : c'est ce qui est à l'intérieur de l'objet et ce qui remplit la pièce. Il peut être plus ou moins rempli selon le taux de remplissage choisi par l'utilisateur, ce qui permet d'imprimer des pièces de volume important sans consommer énormément de matière. Ce remplissage peut prendre plusieurs formes, appelés motifs, comme une grille, un nid d'abeille, un gyroïde, etc... qui ont pour but de renforcer la pièce finale au maximum pour un minimum de remplissage.

Ce fonctionnement fait qu'une fois la couche externe de la coque déposée, il n'est plus possible de mesurer la température de l'extrudeur, car toute la matière déposée ensuite pour cette couche est cachée à la caméra par la coque.

Une des perspectives de ces travaux de thèse est de modifier le positionnement de la caméra sur l'imprimante afin de permettre une observation du filament extrudé tout au long de l'impression d'une pièce.

Pour l'instant, une approche différente a été démarrée. L'idée explorée a été de supprimer toutes les couches de coques et de personnaliser un motif de remplissage afin d'avoir un remplissage complet de la pièce, depuis un côté de la pièce vers le côté opposé, afin que le filament déposé soit toujours visible par la caméra.

Une série d'éprouvettes de traction ont été réalisées avec et sans contrôle par le produit, afin de pouvoir caractériser la résistance mécanique d'une pièce imprimée de manière classique et d'une pièce imprimée avec un contrôle par la température du filament.

¹⁰ <https://all3dp.com/2/strongest-infill-pattern/>, juin 2024

¹¹ <https://all3dp.com/fr/1/meilleur-slicer-3d-logiciel-decoupe-impression-3d/>, juin 2024



Figure 51 : Deux éprouvettes de traction imprimées à gauche sans contrôle, à droite avec contrôle

Cette étude est en cours de développement et constitue une perspective d’approfondissement de ces travaux de thèse.

5.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté la démarche méthodologique et les résultats obtenus pour l'asservissement de la température d'extrusion dans une imprimante 3D FFF, à travers la modélisation et le contrôle en temps réel par le produit imprimé. En introduisant un Jumeau Numérique, nous avons exploré la création d’un contrôle dynamique et précis basé sur des données en temps réel, permettant de rapprocher les performances de l’imprimante des exigences de conception.

Une première étape a consisté en la collecte de données expérimentales sur la température d’extrusion en fonction de différents paramètres de fabrication, tels que la température de consigne, la vitesse d'extrusion, le débit de filament, et la vitesse du ventilateur. Nous avons développé un modèle statique linéaire pour comprendre les relations de base entre les paramètres de fabrication et la température de sortie du filament. Cette modélisation initiale nous a permis d'identifier les facteurs significatifs et d’exclure ceux exerçant une influence négligeable. Les résultats ont montré que la température de commande de la buse et la vitesse du ventilateur sont les principaux déterminants de la température du filament extrudé.

Bien que ce modèle ait permis une meilleure compréhension du système étudié, il était limité par son incapacité à capturer les dynamiques du système. Nous avons donc développé un modèle dynamique, prenant en compte les variations temporelles de la température de la buse et de la vitesse du ventilateur, afin de mieux représenter le comportement réel du système. La modélisation dynamique a démontré que la température de la buse et la vitesse du ventilateur avaient des impacts significatifs et distincts sur la température du filament extrudé : la température de la buse présente une inertie thermique significative, tandis que la vitesse du ventilateur offre une réponse plus rapide mais de moindre amplitude. Ces résultats ont été validés par des expériences et des comparaisons avec des données réelles, assurant la fiabilité du modèle.

Sur la base de ces observations, nous avons conçu et implémenté un contrôleur PID en temps réel, optimisant l'utilisation de ces deux paramètres pour maintenir la température du filament à des niveaux souhaités. L'algorithme développé prend en compte la réactivité différente des paramètres et ajuste de manière itérative pour minimiser les écarts par rapport à la température de consigne.

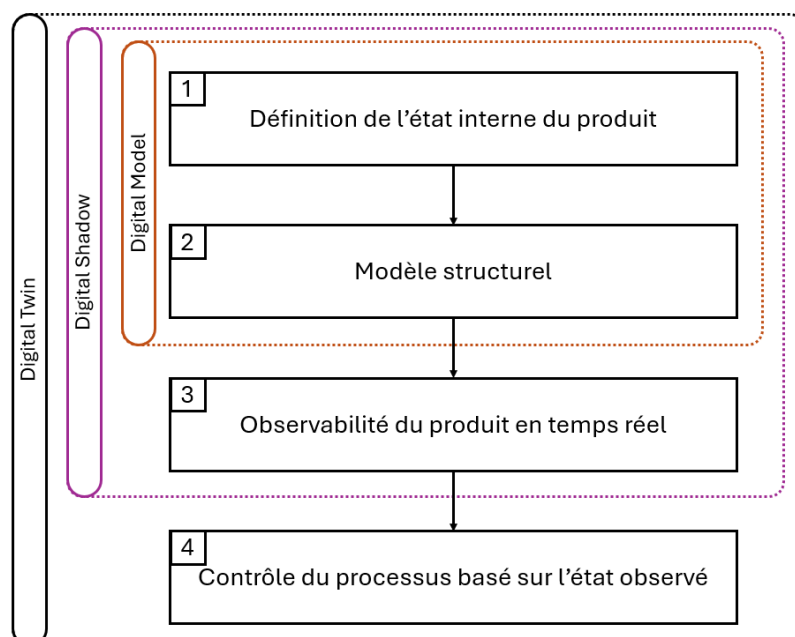
L'application de ce Jumeau Numérique pour le contrôle en temps réel par le produit a été intégrée dans un système global d'asservissement de l'imprimante 3D. Ce système permet de réguler efficacement la température d'extrusion, améliorant ainsi la qualité et la précision des impressions 3D. Les résultats expérimentaux montrent une corrélation acceptable entre le modèle et le comportement réel du système, validant notre approche.

Ce chapitre a démontré l'importance de la modélisation précise et du contrôle en temps réel pour améliorer la qualité et la fiabilité des impressions 3D FFF. Les méthodes et les modèles développés constituent une base solide pour la mise en œuvre d'un système de Jumeau Numérique dans le contexte de la fabrication additive, ouvrant la voie à des applications futures plus avancées et intégrées. Les prochaines étapes incluront l'optimisation du système de contrôle et l'application pratique du modèle d'asservissement sur des pièces fabriquées, afin de valider son efficacité en conditions réelles de production.

CHAPITRE 6.

...VERS UN SYSTEME CONTROLE PAR LE COMPORTEMENT PHYSIQUE DU PRODUIT

*Notre démarche de contrôle par le produit en temps réel à travers
l'utilisation d'un Digital Twin*



6.1 Introduction du chapitre 6

L'impression 3D, ou fabrication additive, a révolutionné la manière dont les objets sont conçus et fabriqués. Cependant, le contrôle précis des paramètres de fabrication est crucial pour garantir la qualité et la fiabilité des pièces produites. L'un des aspects les plus critiques de ce processus est le comportement thermique du filament extrudé, qui influence directement la qualité de la liaison entre les couches successives.

Jusqu'ici, nous avons utilisé pour la réalisation de notre Jumeau Numérique, un modèle comportemental, c'est-à-dire un modèle empirique, capable de reproduire relativement fidèlement le comportement d'un système réel. Néanmoins, ce modèle ne permet pas d'obtenir d'informations supplémentaires sur notre système, car il ne permet pas d'observer les phénomènes physiques sous-jacents qui sont à l'origine du comportement du système réel.

Ainsi dans ce chapitre, nous désirons remplacer le modèle comportemental de la température du filament, établi dans le chapitre 5 de ce manuscrit, par un modèle structurel, c'est-à-dire un modèle phénoménologique et physique, qui va permettre d'observer la température du produit extrudé, comme c'est le cas jusqu'ici, mais également les phénomènes physiques mis en jeu lors de la fabrication de la pièce, et ainsi remonter jusqu'aux propriétés mécaniques couplées à ces phénomènes. Dans ce cadre, nous présentons un travail de modélisation en temps réel du comportement thermique d'une pièce imprimée en utilisant la méthode de Monte-Carlo, dans le but d'optimiser les paramètres de fabrication en temps réel, améliorant ainsi la qualité de la liaison inter-couches.

Ce chapitre va présenter les outils actuels utilisés pour la création de modèles structurels du produit dans le cadre de la fabrication additive, et les contraintes de notre étude qui nous poussent à ne pas se servir de ces éléments. Par la suite, ce chapitre présentera la méthode de Monte-Carlo et son extension, Monte-Carlo Symbolique, afin de justifier pourquoi nous nous sommes penchés sur l'utilisation de ces méthodes de modélisation dans le cadre de cette thèse. Enfin, une partie de ce chapitre proposera la construction d'une fonction rapide et précise permettant d'estimer la température locale sur un intervalle de paramètres avec la méthode Monte Carlo Symbolique. La méthode Monte Carlo Symbolique a été développée jusqu'ici dans la littérature pour l'étude de transferts couplés conducto-convecto-radiatifs en géométrie complexe pour des géométries fixes. Ce chapitre va s'intéresser à la possibilité d'utiliser ces méthodes d'estimation pour la création d'un modèle structurel du comportement thermique d'une pièce imprimée au cours de sa fabrication.

6.2 Modélisation structurelle en impression 3D : Analyse de l'existant

La modélisation physique du comportement thermique des pièces fabriquées par impression 3D est un domaine de recherche complexe et en plein développement, en raison de la nature particulière des procédés de fabrication additive. Cette section va présenter une revue synthétique des méthodes de modélisation physique du comportement thermique des produits réalisés par impression 3D, en mettant un accent particulier sur l'utilisation de méthodes déterministes, notamment par éléments finis (MEF).

Cette revue de littérature s'inspire des travaux de (Turner, Strong and Gold, 2014) qui examine de manière systématique les processus de fabrication additive (AM) par extrusion de matière fondue (FFF), avec un accent particulier sur la conception des processus et les méthodes de modélisation basées sur les phénomènes physiques intervenant. L'article offre une analyse approfondie des éléments de conception et de modélisation des processus de fabrication additive par extrusion, soulignant les domaines nécessitant des améliorations et des validations expérimentales pour optimiser les performances des systèmes FFF. Néanmoins, cette revue de littérature a été publiée il y a dix ans, et le champ d'étude de l'impression 3D a vu une croissance exponentielle sur cette période, ce qui justifie la mise à jour de ces travaux. Cette revue ne se veut pas être systématique ou exhaustive, mais a pour but de présenter une synthèse des travaux scientifiques effectués dans ce domaine.

Un facteur majeur entravant la croissance future de la fabrication additive en général, et des processus basés sur l'extrusion en particulier, est la compréhension limitée de la science des procédés (Michopoulos *et al.*, 2018; Gunasegaram *et al.*, 2021). Les modèles de processus décrivant la dynamique d'extrusion ainsi que le processus de liaison entre les couches successives de matériau sont essentiels pour développer des stratégies de contrôle avancées pour les systèmes AM. Comprendre les relations entre les paramètres de traitement et les propriétés finales des pièces est important pour permettre la conception de pièces pour la fabrication, développer des méthodes de qualification des pièces pour un usage industriel et faciliter des stratégies de développement de matériaux plus intelligentes. Les éléments clés d'un processus FFF ou similaire comprennent le mécanisme d'alimentation du filament par rouleaux pinceurs, la dynamique de la buse chauffée, l'étalement du filament extrudé, la liaison inter-couches de matériau et les changements de forme dus aux gradients thermiques au sein de la pièce. Mis à part le premier aspect, le mécanisme d'alimentation du filament, qui ne nous intéresse pas particulièrement dans le cadre de notre étude, l'état de l'art actuel de la modélisation de chacun de ces aspects sera discuté dans cette partie.

6.2.1 Comportement thermomécanique du filament dans la tête d'impression

La tête d'impression, où le fil de polymère solide est fondu et poussé à travers une petite buse d'impression, sont les éléments définissant ces procédés. La dynamique du liquéfacteur est complexe et difficile à modéliser, car les propriétés thermomécaniques de la matière fondue évoluent non linéairement par rapport à la température et aux contraintes mécaniques subies par le filament dans la tête d'impression. En impression 3D, la vitesse d'alimentation du filament et donc la taille des cordons imprimés sont limitées par la pression dans la buse. Cette vitesse est ajustée en temps réel selon le déplacement de la tête d'impression dans le système. La quantité de matière fondue dans la tête d'impression, sa température, sa viscosité et sa pression dépendent de cette vitesse. Ces facteurs contrôlent le débit de matériau dans la tête d'impression, influençant la résolution de l'impression. Ces dynamiques sont cruciales pour les algorithmes de contrôle des systèmes commerciaux et pour définir les propriétés nécessaires des matériaux utilisés.

Le comportement visqueux de la matière fondue dans la tête d'impression est un facteur important à considérer pour décrire le fonctionnement du liquéfacteur et de la buse d'extrusion. Les polymères utilisés dans les procédés AM par extrusion sont généralement thixotropes (c'est-à-dire des matériaux dont la viscosité diminue avec le temps lorsqu'ils sont sous contrainte) et sont souvent supposées suivre un modèle de viscosité de loi de puissance (Bellini, Güçeri and Bertoldi, 2004). La viscosité dépend de la température et des contraintes mécaniques subies par le matériau.

À ce jour, seuls des modèles de viscosité suivant la loi en puissance (Koszkul and Nabialek, 2004) ont été utilisés pour les têtes d'impression FFF. Leur principal avantage est la simplicité mathématique de ces modèles. Cependant, ils ne capturent pas certains aspects importants du comportement des polymères fondus, comme la contrainte de seuil, typique de nombreux polymères (Pandey and Pradhan, 2018).

En plus du comportement visqueux, la géométrie de la tête d'impression influence fortement le comportement de la matière fondue. La plupart des systèmes actuels utilisent un tube cylindrique droit avec une connexion conique vers la buse d'impression, comme illustré à la Figure 52. Pour faciliter la modélisation, la tête d'impression est souvent divisée en trois sections. Les paramètres géométriques de la tête d'impression jouent un rôle important sur l'évolution de la température du filament extrudé (Seppala and Migler, 2016; Osswald, Puentes and Kattinger, 2018; Van Waeleghem *et al.*, 2022), ainsi que sur sa pression tout au long de la tête d'impression (Singhal *et al.*, 2023; de Vries *et al.*, 2024).

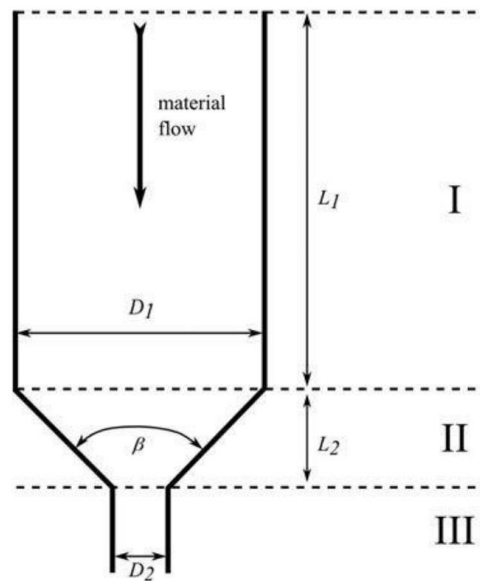


Figure 52 : représentation de la tête d'impression en trois parties pour la modélisation (Turner, Strong and Gold, 2014)

La modélisation du transfert de chaleur dans la tête d'impression est complexe en raison de la variation des propriétés de la matière avec la température, la pression et les contraintes mécaniques. Pour résoudre ce problème de complexité, certains travaux se sont récemment intéressés à la modélisation numérique de la température (Tichý *et al.*, 2021), de la viscosité (Prusinowski and Kaczyński, 2017) et de la pression (Moretti, Rossi and Senin, 2021) de différents thermoplastiques au sein de la tête d'impression, comme par exemple (Serdeczny *et al.*, 2018, 2020) reprenant les modèles introduits par (Bellini, Güçeri and Bertoldi, 2004) et les appliquant à un programme de modélisation de mécanique des fluides pour étudier en particulier le comportement de l'ABS. L'usage de plus en plus important de logiciels de simulation numérique permet de comparer les modèles existants dans la littérature à des cas plus complexes comme par exemple le comportement non-newtonien de certains matériaux (Van Waeleghem *et al.*, 2022), les comportements non-linéaires de certains phénomènes (de Vries *et al.*, 2024), ou pour déterminer des limites de fonctionnement stable de l'imprimante (Zhang *et al.*, 2022).

Certains travaux expérimentaux sont allés plus loin dans la comparaison expérimentale, comme (Peng, Vogt and Cakmak, 2018) qui ont utilisé un filament dans lequel des micro-thermocouples ont été placés, afin d'étudier localement l'évolution de la température du filament pendant son passage dans la tête d'impression, pour comparer ces résultats aux modèles empiriques existants.

Les modèles physiques développés jusqu'à présent pour l'étude du comportement physique du filament offrent une compréhension supplémentaire des phénomènes intervenants dans la montée en température du filament extrudé, et permettent de déterminer mathématiquement l'état physique du produit lors de son extrusion. Ces efforts de modélisation permettent ainsi une observabilité plus

poussée de la pièce pendant son impression. Cependant, ces modèles nécessitent une connaissance importante d'un nombre important de paramètres inhérents à la machine utilisée, comme la géométrie de la tête d'impression et de la buse, ce qui ne convient pas forcément à une mise en place comme celle que l'on veut réaliser dans le cadre de cette thèse, c'est-à-dire l'application d'un contrôle qui puisse être adapté à un maximum d'imprimantes et de matériaux différents avec un minimum d'informations sur ces éléments. L'usage de ces modèles est de manière générale plus dirigé vers l'optimisation de conception des imprimantes en elle-même, ou la résolution de problèmes d'impression, comme la détection et prédiction de *nozzle clog* (obstruction de buse) (Tlegenov, Lu and Hong, 2019).

De plus, une autre problématique réside dans le choix des outils de modélisation utilisés pour estimer le comportement thermophysique du produit pendant l'impression, car il s'agit généralement de méthodes par éléments finis, qui nécessitent généralement un temps d'exécution trop long pour pouvoir l'implémenter au sein d'un outil comme le nôtre, qui exécute une commande tous les 0,1s environ.

6.2.2 Disposition géométrique du filament après l'extrusion et étude de la liaison inter-couches

Dans la buse, le polymère fondu est soumis à des contraintes mécaniques. Libérées des parois de la tête d'impression, les contraintes sur la matière fondue se relâchent, ce qui entraîne une expansion radiale appelée *die swell* (gonflement en français) (Bellini, 2002). Ce phénomène, qui va définir la résolution de la pièce imprimée, se mesure par le ratio de gonflement, c'est-à-dire le rapport entre le diamètre maximum du matériau extrudé et celui de l'ouverture de la buse. Ce ratio varie de 1,05 à plus de 1,7 (Colon *et al.*, 2023) selon les propriétés du matériau, la géométrie de la buse, la vitesse d'extrusion et les contraintes mécaniques à l'intérieur de la buse (De Rosa, Tammaro and D'Avino, 2023).

En sortant de la buse d'extrusion, la matière fondue est également refroidie par convection due à l'air ambiant. Cependant, la conduction thermique depuis la matière encore dans la buse ralentit ce processus. Ainsi, plus la conductivité thermique de la matière fondue est élevée, plus le refroidissement du cordon extrudé est lent (Prajapati *et al.*, 2018; Prajapati, Ravoori and Jain, 2018).

Le cordon imprimé s'étale en une forme allongée, avec la vitesse d'étalement et la forme finale dépendant de la viscosité de la matière fondue et des énergies de surface. En s'étalant, le cordon refroidit et sa viscosité augmente jusqu'à devenir solide. La largeur finale du filament déposé, appelé cordon, détermine la résolution de l'impression et la zone de contact entre les cordons voisins. Bien

que ce pan de l'étude de l'impression 3D ne soit pas très couvert par la littérature, quelques travaux ont proposé des modèles, basés sur la conservation de la masse et la variation de la viscosité du filament lors de son refroidissement, pour déterminer la forme et les dimensions du filament déposé (Serdeczny *et al.*, 2018; Hebda *et al.*, 2019).

La solidité d'une pièce fabriquée par FFF sera fondamentalement limitée par la solidité de la liaison entre les cordons de matière voisins. Cette solidité de liaison dépendra de l'énergie d'adhésion/cohésion. La forme oblongue du cordon crée inévitablement de petits vides dans la pièce. La solidité de la liaison entre les cordons, et donc les propriétés mécaniques de la pièce, dépend de la zone de contact entre ces cordons et de la taille des vides.

La solidité d'une pièce fabriquée par FFF sera fondamentalement limitée par la solidité de la liaison entre les cordons de matière voisins. Cette solidité de liaison dépendra de l'énergie d'adhésion/cohésion. La forme oblongue du cordon crée inévitablement de petits vides dans la pièce, comme représenté à la Figure 53. La solidité de la liaison entre les cordons, et donc les propriétés mécaniques de la pièce, dépend de la zone de contact entre ces cordons et de la taille des vides (Garzon-Hernandez *et al.*, 2020).

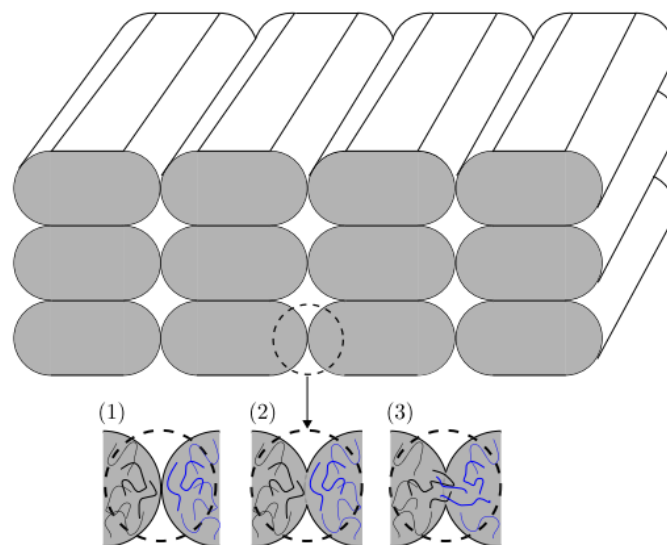


Figure 53 : Formation des liaisons inter-couches par frittage : (1) contact entre surfaces ; (2) formation du col de frittage ; (3) formation du col de frittage et diffusion moléculaire à l'interface, d'après (Garzon-Hernandez *et al.*, 2020)

La température est un paramètre critique dans ce processus, et elle influence la liaison inter-couches de plusieurs manières. Ainsi, une température d'extrusion trop basse peut entraîner une fusion insuffisante du filament, car elle ne permettra pas une diffusion moléculaire au niveau du col de frittage entre deux filaments (Brenken *et al.*, 2019; Barocio *et al.*, 2022), limitant la diffusion

moléculaire entre les couches, alors qu'une température trop élevée peut dégrader le matériau, entraînant des fragilités et des défauts dans la pièce finale. Ainsi, (Garmabi *et al.*, 2022) montrent que la température d'extrusion, ainsi que la température de l'enceinte d'impression, jouent un rôle déterminant dans la résistance mécanique des liaisons inter-couches : plus on va extruder à une température élevée, plus on va avoir une diffusion moléculaire et un frittage important, et plus la liaison inter-couches aura de bonnes propriétés mécaniques. D'autre part, plusieurs études ont permis d'établir des modèles structurels (Garzon-Hernandez *et al.*, 2020; Basgul, Thieringer and Kurtz, 2021; Barocio *et al.*, 2022) permettant de relier l'état de la liaison inter-couches ou les dimensions des zones de contact à la résistance mécanique de la pièce finale.

Actuellement, bien que des modèles et études existent pour comprendre et optimiser la liaison inter-couches en impression 3D FDM/FFF, il n'existe pas de modèle complet intégrant tous les paramètres d'impression pour prédire la résistance mécanique de la pièce finale. Seules des études comportementales (D'Amico and Peterson, 2018; Deshpande *et al.*, 2019; Jaisingh Sheoran and Kumar, 2019; Helsel *et al.*, 2021; Sharafi *et al.*, 2021) se concentrent sur les liens entre les paramètres individuels, tels que la température et les propriétés des matériaux, et les caractéristiques mécaniques.

À l'heure actuelle, les modèles existants ne permettent pas de caractériser pleinement et précisément la résistance mécanique des matériaux utilisés en impression 3D FDM/FFF. Ces modèles offrent des perspectives utiles et montrent des corrélations entre certains paramètres d'impression et les propriétés mécaniques, mais ils manquent de la complexité nécessaire pour prendre en compte l'ensemble des variables impliquées. En conséquence, il est difficile de prédire avec précision la résistance mécanique finale des pièces imprimées uniquement à partir des paramètres d'impression.

Cependant, cette limitation ouvre une voie de recherche intéressante et prometteuse pour la poursuite de ces travaux. Le développement de modèles plus sophistiqués et complets pourrait permettre de relier directement les paramètres d'impression, tels que la température d'extrusion, la vitesse d'impression, la géométrie de la buse, et les propriétés des matériaux, à la résistance mécanique des pièces imprimées. Un tel outil aurait un impact significatif sur l'optimisation des processus d'impression 3D, permettant de prédire et d'améliorer les performances des pièces dès la phase de conception, et d'être capable de prédire à partir de l'état mesuré d'une pièce, pendant son impression, ses propriétés mécaniques, et de contrôler la fabrication en fonction d'un objectif qui ne serait plus une certaine température d'extrusion, mais une certaine résistance mécanique de la pièce finale.

Cette approche non seulement enrichirait la compréhension théorique de l'impression 3D, mais offrirait également des applications pratiques significatives pour la fabrication additive, en rendant les processus plus prévisibles et fiables.

Ce qu'il faut retenir de notre état de l'art sur la modélisation structurelle en FFF
○ Cette partie constitue une revue qui examine les méthodes de modélisation, notamment les méthodes par éléments finis (MEF), en actualisant les travaux de Turner, Strong et Gold (2014). ○ Elle traite de la dynamique du filament dans la tête d'impression, la viscosité de la matière fondue, la géométrie de la tête et les interactions thermomécaniques. Les modèles récents développent ces aspects mais ne capturent pas tous les comportements complexes. ○ La revue aborde aussi la disposition du filament après extrusion et la solidité des liaisons entre couches, influencées par des phénomènes comme le gonflement du filament et le refroidissement. La température est un paramètre fondamental pour la fusion et la liaison des couches. ○ Malgré les avancées, les modèles existants ne prédisent pas pleinement la résistance mécanique des pièces imprimées, nécessitant des recherches futures pour des modèles plus complets et précis. ○ Les modèles actuels posent plusieurs problèmes pour notre application. Ils nécessitent une connaissance détaillée des paramètres spécifiques à chaque machine, limitant leur adaptabilité. De plus, les méthodes par résolutions de ces modèles présentent des temps de calcul trop longs pour une utilisation en temps réel, incompatible avec notre besoin. Ces limitations rendent difficile le contrôle efficace du processus d'impression et l'optimisation des propriétés mécaniques des pièces imprimées.

Les modèles décrivant le comportement thermique du filament déposé présents dans la littérature ne s'adaptent pas efficacement à notre cas d'étude, car ils sont trop spécifiques et ne permettent pas une résolution en temps réel. Dans la suite de ce chapitre, nous allons donc nous pencher sur une autre méthode qui pourrait permettre de modéliser les phénomènes physiques intervenant dans la formation de la liaison inter-couches en temps réel : les méthodes de résolution de Monte-Carlo Symbolique (MCS).

6.3 Méthode de Monte-Carlo et usage en thermique couplée

Cette section développe les concepts méthodologiques nécessaires à notre application, en introduisant les concepts liés à la méthode de Monte-Carlo (MMC) et à l'utilisation de Monte-Carlo Symbolique (MCS).

La méthode de Monte-Carlo est une méthode numérique de calcul intégral basée sur des échantillonnages aléatoires pour estimer des valeurs inconnues ou résoudre des problèmes qui peuvent être formulés en termes de probabilités, dans de nombreux domaines tels que les mathématiques, la finance, ou la physique. Cette partie du chapitre va aborder le fonctionnement de la méthode de Monte-Carlo (MMC), ainsi que son pendant en symbolique (MCS), afin d'étudier comment ces méthodes pourraient être utiles pour estimer l'influence des différents phénomènes thermiques sur une pièce fabriquée par impression 3D, afin d'améliorer son observabilité.

6.3.1 Fonctionnement de la méthode de Monte-Carlo (MMC)

La méthode de Monte-Carlo utilise des échantillonnages aléatoires pour résoudre numériquement des modélisations mathématiques par approche stochastique. Cette méthode implique la génération d'un grand nombre d'échantillons aléatoires pour estimer la valeur numérique d'une intégrale. Pour cela elle a recours à des distributions de probabilité et permet de résoudre des équations différentielles, notamment grâce aux approches en intégrale de chemin proposées par Feynman et Kac (Kac, 1947, 1949, 1951).

Contrairement à une méthode numérique déterministe, la simulation par Monte Carlo établit des estimations en générant plusieurs réalisations d'une variable aléatoire puis en faisant la moyenne de ces réalisations. Il en résulte une estimation de la grandeur d'intérêt ainsi qu'une estimation de l'écart-type associé à la variable aléatoire vu alors comme une estimation de l'erreur de calcul associée. En d'autres termes, elle crée un modèle de distribution de probabilité des résultats potentiels en tenant compte de l'incertitude inhérente à chaque variable, souvent représentée par une distribution uniforme ou normale. La simulation réitère ensuite ce processus à de multiples reprises, utilisant à chaque fois un jeu différent de nombres aléatoires compris entre les valeurs minimale et maximale définies pour chaque variable. Cette méthode repose sur deux principes essentiels :

- La loi des grands nombres : La moyenne de nombreuses simulations converge vers l'espérance de la variable aléatoire.

L'objectif de la méthode de Monte-Carlo est de calculer une certaine quantité I . On va mettre cette quantité sous la forme d'une espérance $I = \mathbb{E}[X]$ d'une variable aléatoire X . La méthode de Monte-Carlo consiste à générer un échantillon de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (iid) $X_1, \dots, X_n$ suivant la même loi que X . Ensuite, on estime l'espérance $\mathbb{E}[X]$ avec l'estimateur, souvent appelé estimateur de Monte-Carlo ou de la moyenne empirique :

$$\mu_n := \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k$$

Ainsi d'après la loi des grands nombres, pour une valeur de N suffisamment grande, μ_n est supposé être une bonne approximation de la valeur recherchée I , c'est-à-dire $\mathbb{E}[X]$.

- Le théorème de la limite centrale : Lorsque le nombre de simulations N d'une variable aléatoire est grand, la moyenne de ces N simulations est également une variable aléatoire qui suit une distribution gaussienne avec une espérance égale à celle de la variable aléatoire initiale et un écart type diminuant selon une loi en $1/\sqrt{N}$. Cela signifie que cet estimateur est de plus en plus précis avec un échantillon plus grand.

En pratique, la méthode de Monte-Carlo consiste à :

- Reformuler le problème en termes statistiques pour exprimer l'observable comme l'espérance d'une variable aléatoire.
- Effectuer de nombreuses simulations pour estimer cette observable.
- Estimer et interpréter l'incertitude de cette estimation.

Exemple : Admettons que l'on souhaite calculer l'intégrale d'une fonction. Cela correspond à déterminer l'aire algébrique sous sa courbe. Estimer l'intégrale d'une fonction revient donc à estimer l'aire d'une surface et on peut donc appliquer une méthode de Monte-Carlo. Par exemple supposons que l'on veuille estimer une observable O s'écrivant comme l'intégrale suivante :

$$O = \int_2^4 x^2 dx$$

On peut assez facilement intégrer $f(x) = x^2$ sur $[2; 4]$ et on trouvera que $O = \frac{56}{3} \approx 18,667$.

Nous allons voir comment nous pouvons retrouver ce résultat par Monte-Carlo.

On peut réécrire l'intégrale O comme :

$$O = \int_2^4 \frac{p(x) f(x)}{p(x)} dx = \int_2^4 p(x) \omega(x) dx$$

Avec p une fonction densité de probabilité qui est une distribution uniforme, on peut donc écrire :

$$p(x) = \frac{1}{4-2} = 0,5 \quad \forall x \in [2,4]$$

Et avec $\omega(x) = \frac{f(x)}{p(x)}$ appelé poids de Monte Carlo, une réalisation aléatoire de la variable aléatoire W .

L'approche par la méthode de Monte-Carlo consiste à générer aléatoirement N réalisations indépendantes et identiquement distribuées ω_n de cette variable aléatoire. En accord avec la loi des grands nombres, l'estimateur de l'observable O converge vers l'espérance de la variable aléatoire W .

On peut alors réécrire l'intégrale :

$$O \approx E(W) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_n$$

Soit un échantillon $r_1, r_2, \dots, r_n$ tiré aléatoirement à partir de la densité de probabilité $p(x)$. On aura par exemple :

- **n = 1**: $x_1 = 2,5 \rightarrow f(x_1) = 2,5^2$ et $p(x_1) = 0,5$ donc $\omega(x_1) = \frac{2,5^2}{0,5} = 12,5$
- **n = 2**: $x_2 = 3,2 \rightarrow f(x_2) = 3,2^2$ et $p(x_2) = 0,5$ donc $\omega(x_2) = \frac{3,2^2}{0,5} = 20,48$
-

A partir de ces tirages aléatoires, nous pouvons déterminer l'espérance et la variance de la variable W .

Par exemple, pour un échantillon de taille 100, l'estimation de O par la méthode de Monte-Carlo sera 18,62 avec un écart-type de 0,682.

Pour un échantillon de taille 10000, l'estimation de O par la méthode de Monte-Carlo sera 18,72 avec un écart-type de 0,069.

On retrouve une estimation de O proche de sa valeur réelle, et on voit bien que, en accord avec le théorème de la limite centrale, on a un écart-type diminuant selon une loi en $1/\sqrt{N}$.

6.3.2 Monte-Carlo pour la résolution de problèmes de thermique couplée

Les méthodes de Monte-Carlo sont largement utilisées dans la simulation des phénomènes physiques complexes en raison de leur flexibilité et de leur capacité à gérer des géométries complexes (Ibarrart *et al.*, 2022). Dans le cadre des problèmes de thermique couplée, où les transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement doivent être pris en compte simultanément, les algorithmes de Monte-Carlo offrent une alternative efficace aux méthodes déterministes. Cette partie du chapitre présente l'application de la méthode de Monte-Carlo pour la simulation des problèmes de thermique couplée. Cette section se base notamment sur les travaux de (Tregan *et al.*, 2023). Ces travaux présentent comment, dans le contexte des transferts thermiques, il est possible de modéliser la propagation de la chaleur sous forme de trajectoires stochastiques qui intègrent les effets de conduction, convection et radiation.

Les fondations théoriques de cette approche sont ancrées dans l'utilisation des propagateurs et des fonctions de Green. Ces outils mathématiques permettent de formaliser les interactions entre les différents modes de transfert thermique. Les propagateurs définissent la probabilité qu'un quantum d'énergie se déplace d'un point à un autre dans le matériau, en tenant compte des différents modes de transfert thermique.

6.3.2.1 Modélisation des Transferts Thermiques Couplés

- Conduction

La conduction est le transfert de chaleur au sein d'un matériau dû à la diffusion thermique. Elle est modélisée par l'équation de la chaleur, une équation aux dérivées partielles qui décrit la distribution spatiale et temporelle de la température. Dans la méthode de Monte-Carlo, la conduction peut être simulée en considérant les sauts aléatoires des particules de chaleur, en utilisant des propagateurs spécifiques à la diffusion thermique.

- Convection

La convection implique le transfert de chaleur par le mouvement d'un fluide. Elle est plus complexe à modéliser en raison de l'interaction entre la dynamique des fluides et le transfert thermique. Les algorithmes de Monte Carlo modélisent la convection par le biais d'un coefficient de transfert convectif en faisant l'hypothèse d'une cavité fluide parfaitement mélangée.

- Rayonnement

Le rayonnement thermique est le transfert de chaleur par émission de rayonnement électromagnétique. Dans sa vision corpusculaire, il est régi par les lois de Planck, Stefan-Boltzmann et Wien. Dans la méthode de Monte Carlo, le rayonnement est représenté comme un échange de surface à surface en milieu participant. Les propagateurs pour le rayonnement tiennent compte des propriétés optiques des matériaux, telles que l'absorption, la réflexion et la transmission.

6.3.2.2 Algorithme Intégré de Monte-Carlo

L'algorithme de Monte-Carlo intégré combine les trois modes de transfert thermique dans une simulation unifiée. Chaque quantum d'énergie est suivi à travers des étapes de conduction, convection et rayonnement, en utilisant des propagateurs appropriés pour chaque phase. Cet algorithme bénéficie des avancées en graphisme informatique pour traiter les géométries complexes et les interactions multiples entre les quanta d'énergie et les frontières des matériaux.

Les étapes clés de l'algorithme sont les suivantes :

- Initialisation : Définition des conditions initiales de température et des propriétés thermiques des matériaux.
- Propagation : Simulation des trajectoires aléatoires des quanta de chaleur en utilisant les propagateurs de conduction, convection et radiation.
- Interaction : Gestion des interactions des quanta de chaleur avec les frontières des matériaux et entre eux, selon les propriétés thermiques et optiques.
- Agrégation des Résultats : Compilation des résultats de nombreuses simulations pour obtenir une distribution de température moyenne.

La méthode de Monte-Carlo fournit un cadre puissant et flexible pour la simulation des problèmes de thermique couplée. En intégrant les transferts de chaleur par conduction, convection et radiation dans un seul algorithme, elle permet de traiter des systèmes complexes avec précision. Les développements récents dans ce domaine, basés sur les propagateurs et les fonctions de Green, ouvrent de nouvelles perspectives pour l'étude et l'optimisation des systèmes thermiques dans diverses applications industrielles et scientifiques.

6.3.3 Principe de la méthode de Monte-Carlo Symbolique (MCS)

Cette section décrit le fonctionnement de la méthode de Monte-Carlo Symbolique (MCS) et son intérêt pour une application dans le cadre de nos travaux. La méthode de Monte-Carlo symbolique, introduite par William L. Dunn (Dunn, 1983; Dunn and Shultis, 2012), combine les avantages des simulations Monte-Carlo avec la manipulation symbolique. Plutôt que de réaliser directement un calcul de l'observable, on réalise un calcul de l'observable sous forme fonctionnelle par rapport aux différentes grandeurs thermophysiques du cas d'étude, ce qui permet d'étudier un système complexe de manière formelle.

Dans un algorithme de Monte-Carlo classique, l'objectif est d'estimer une observable telle que la température en un point donné à un instant donné. Le résultat final du calcul donne une estimation de l'observable et une estimation de l'incertitude associée, permettant de définir un intervalle de confiance pour cet observable. La méthode de Monte-Carlo Symbolique, en revanche, ne se limite pas à une seule valeur de l'observable. Elle vise à comprendre comment cet observable varie lorsque certains paramètres du problème changent. L'observable est donc vue comme une fonction de plusieurs paramètres. Pendant l'exécution d'un calcul MCS, les valeurs de certains paramètres restent variables. À l'issue de cette simulation, l'estimation de l'observable et l'estimation de l'erreur statistique ne sont plus des valeurs fixes, mais des fonctions de ces paramètres.

Dans des applications telles que la conception de systèmes de refroidissement ou de chauffage, comme cela a été abordé dans la thèse de Léa Penazzi (Penazzi, 2022), optimiser les performances en fonction de plusieurs critères (comme l'efficacité énergétique, les coûts, et la fiabilité) est essentiel. La méthode MCS permet d'explorer un espace de paramètres plus vaste et d'identifier les configurations optimales plus rapidement et avec une précision connue.

6.3.4 Avantage de la méthode de Monte-Carlo Symbolique pour une application en temps réel

La méthode de Monte-Carlo Symbolique utilise des techniques symboliques pour représenter et manipuler des probabilités et des distributions de manière compacte. Cela permet de réduire la complexité computationnelle par rapport aux méthodes numériques traditionnelles de Monte-Carlo, surtout lorsque le nombre de variables aléatoires ou les dimensions de l'espace de recherche sont élevés. En permettant une évaluation simultanée des effets de plusieurs paramètres, la méthode MCS réduit le besoin de nombreuses simulations distinctes pour chaque combinaison de paramètres (Penazzi *et al.*, 2023). Cela se traduit par une économie de ressources informatiques et de temps,

particulièrement bénéfique lorsque les simulations sont coûteuses en termes de calcul. Cela est d'autant plus important pour les applications en temps réel où les décisions doivent être prises dans des délais très courts. C'est notamment notre cas pour notre application du SCP à une application en temps réel. Contrairement à la plupart des modèles présentés lors de la première partie de ce chapitre, la méthode MCS permet, après un premier calcul plus long en amont, d'obtenir un modèle paramétrique beaucoup plus rapide, et qui pourrait donc être utilisé pour une application en « temps réel ».

De plus, les modèles paramétriques permettent une meilleure interpolation et extrapolation des résultats. Cela signifie qu'une fois les relations entre les paramètres et les observables établies, il est possible de prédire les performances du système sous des conditions non testées directement dans les simulations initiales, augmentant ainsi l'efficacité du processus de conception et de développement.

Enfin, les méthodes de Monte-Carlo et de Monte-Carlo Symbolique ne sont pas sensibles à la complexité de la pièce étudiée (Ibarrart *et al.*, 2022), contrairement aux méthodes déterministes, ce qui, dans le cas de la fabrication 3D, où les pièces produites peuvent avoir des géométries extrêmement complexes, s'avère être un point fort.

Ce qu'il faut retenir de la méthode de Monte-Carlo
○ Les méthodes de Monte-Carlo (MMC) utilisent des échantillonnages aléatoires pour estimer des grandeurs d'intérêt. Elles permettent de modéliser l'influence des phénomènes thermiques sur une pièce imprimée en 3D, améliorant ainsi son observabilité. Ces méthodes sont efficaces pour simuler des phénomènes thermiques complexes comme la conduction, la convection et la radiation dans les matériaux. ○ La méthode de Monte-Carlo Symbolique (MCS) va plus loin en permettant d'analyser comment une observable varie avec plusieurs paramètres, offrant une estimation fonctionnelle plutôt qu'une valeur unique. Cela réduit la complexité computationnelle et est particulièrement avantageux pour les applications en temps réel, où les conditions changent rapidement. ○ Ces méthodes sont pertinentes pour notre application en temps réel du SCP, car elles offrent une modélisation paramétrique plus rapide après une première computation plus longue. Elles permettent également une meilleure interpolation et extrapolation des

résultats, et ne sont pas sensibles à la complexité des pièces imprimées, contrairement aux méthodes par éléments finis.

6.4 Suivi en temps réel des phénomènes thermiques par MCS : application à l'impression 3D

Pour modéliser le comportement thermique de la pièce en cours d'impression, nous utilisons une mesure continue de la température du filament extrudé. Cette mesure est obtenue à l'aide de capteurs placés à proximité de la buse de l'imprimante 3D. Les données collectées permettent de suivre l'évolution thermique du filament et de chaque couche déposée. Ce pan de nos travaux constitue un élément de travail collaboratif, mené avec Léa Penazzi, postdoctorante spécialisée sur l'usage des méthodes de Monte-Carlo Symbolique pour des problèmes de thermique couplée, avec qui nous explorons l'emploi de ces méthodes pour la modélisation en temps-réel du comportement thermique global d'une pièce imprimée par impression 3D FFF.

Notre objectif, via l'utilisation de la méthode MCS, est d'obtenir à partir de ces mesures, et d'un ensemble de conditions limites connues pour notre impression, un suivi au cours du temps de la température de la pièce, après son impression, en un certain point de la pièce, appelé « point sonde ». Si ce suivi est réalisé sur un nombre suffisamment grand de points sonde sur notre pièce, il est alors possible de suivre par interpolation la température en fonction du temps n'importe où sur la pièce.

6.4.1 Mise en Place du Modèle Thermique

Le modèle thermique est construit en résolvant les équations de transfert de chaleur, tenant compte de la conduction, de la convection et de la radiation. Les paramètres thermiques tels que la conductivité thermique, la capacité calorifique et les conditions aux limites (température ambiante, flux thermique de la buse) sont intégrés dans le modèle.

- Conduction Thermique : La conduction est modélisée par l'équation de diffusion thermique : $\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \Delta T$, où T est la température, t le temps, et α la diffusivité thermique.
- Convection et Radiation : Les effets de convection et de radiation sont incorporés par des termes de perte de chaleur aux surfaces exposées : $q = h(T - T_{\infty}) + \epsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4)$, où h est le coefficient de convection, ϵ l'émissivité, σ la constante de Stefan-Boltzmann, et T_{∞} la température ambiante.

On considère ici, en se basant sur les différents modèles de refroidissement présents dans la littérature (Pollard *et al.*, 2017; Pandey and Pradhan, 2018), que la dissipation thermique par rayonnement est négligeable, mais la conserver pour notre calcul serait également possible pour notre simulation.

6.4.2 Simulation avec Monte-Carlo Symbolique

Pour réaliser une simulation avec Monte-Carlo Symbolique dans notre cas, il est nécessaire de suivre plusieurs étapes. Ces étapes vont être détaillées en prenant comme exemple la pièce fabriquée dans les chapitres précédent, le « *wall* », pour lequel on va pour l'instant se contenter d'un cas simple où la pièce finie est chauffée par son contact avec le lit d'impression :

1. Initialisation : Définir les paramètres initiaux et les conditions aux limites

Cette première étape va consister à décider où placer nos points sonde, ainsi que définir toutes les conditions limites, et notamment toutes les sources de notre système. Petit rappel, lorsque l'on parle de "source", ce sont les températures imposées ainsi que les températures fluides dans les conditions limites convectives et pas le coefficient de convection h par exemple.

Pour notre exemple, un ensemble de 13 points sonde ont été répartis sur le « *wall* », représenté à la Figure 54.

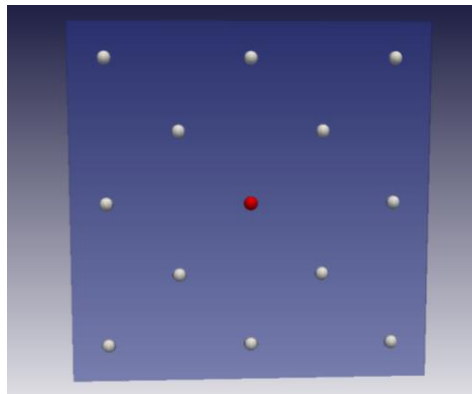


Figure 54 : Positionnement de 13 points sonde sur le « *wall* »

Un ensemble de sources est ensuite défini, représenté à la Figure 55. L'air ambiant et les températures sur 5 des 6 faces sont définies à 20°C (294K), et la face du bas est en contact avec le lit d'impression, chauffé à 60°C (333K).

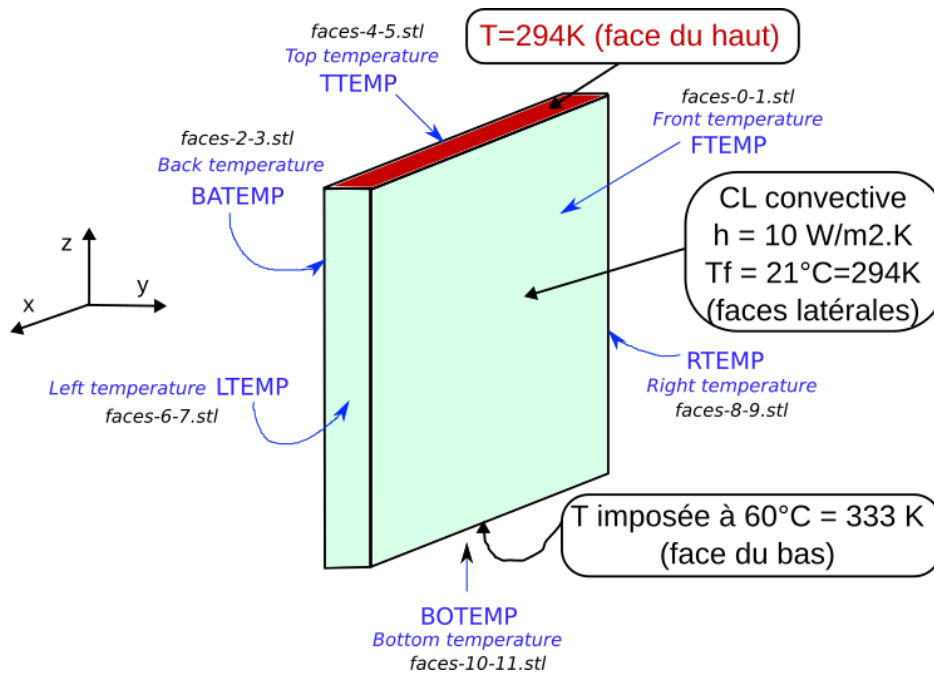


Figure 55 : définition des sources pour l'application de la MCS

2. Génération de propagateurs

Une fois les conditions limites du système identifiées, on va définir pour chaque point son propagateur, c'est-à-dire un ensemble de coefficients (autant de coefficients que de sources) qui vont permettre de définir la température du point-sonde considéré en fonction des différentes sources. Le propagateur est réalisé à travers l'exécution d'un certain nombre de chemins aléatoires, qui vont tous finir par atteindre une certaine source. En fonction du nombre de chemins qui atteint chaque source, et du nombre de pas de temps qu'il met à atteindre cette source, on obtiendra pour chaque source un coefficient.

Dans notre exemple, le propagateur correspond à la fonction de transfert liant la température au point sonde (dans notre exemple ici pour un temps infini, au stationnaire donc) avec toutes les sources du problème (température imposée en haut et en bas, conditions limites convectives sur les faces latérales). Il est possible de modifier les valeurs des sources pour tester pour chaque fonction de transfert l'estimation de température au point. Ces calculs sont valables quelles que soient les valeurs de source, il n'y a pas de gamme de validité de valeur dans l'absolu.

Le Tableau 1 illustre les différents propagateurs obtenus pour chacun de nos points sonde.

Pour chacun des points sondes, sont enregistrées les coordonnées (X, Y, Z) ainsi que les coefficients de la fonction de transfert estimés pour chaque calcul avec 10 000 chemins à chaque fois. Chaque fonction s'exprime telle que :

$$T(\text{Sources} | X, Y, Z) = a_FTEMP * FTEMP + b_BATEMP * BATEMP + \dots + f_BOTEMP * BOTEMP$$

Il y a autant de coefficients que de sources, donc 6 en tout.

Location number	Coordonnées			Coefficients de la fonction de transfert						E[T] (K)
	X	Y	Z	a_FTEMP	b_BATEMP	c_TTEMP	d_LTEMP	e_RTEMP	f_BOTEMP	
1	25	-0,5	25	0,4922	0,5076	0,0002	0	0	0	294
2	5	-0,5	45	0,416	0,4374	0,1307	0	0,0159	0	294
3	15	-0,5	45	0,4231	0,4438	0,1329	0	0,0002	0	294
4	45	-0,5	45	0,416	0,4364	0,1304	0,0172	0	0	294
5	15	-0,5	35	0,4906	0,5061	0	0,0031	0,0002	0	294
6	35	-0,5	35	0,4906	0,5061	0,0031	0,0002	0	0	294
7	5	-0,5	25	0,4817	0,499	0,0002	0	0,0191	0	294
8	45	-0,5	25	0,4797	0,4985	0,0001	0,0217	0	0	294
9	15	-0,5	15	0,4912	0,5061	0	0	0,0002	0,0025	294,0975
10	35	-0,5	15	0,4912	0,5061	0	0,0002	0	0,0025	294,0975
11	5	-0,5	5	0,4169	0,437	0	0	0,015	0,1311	299,1129
12	25	-0,5	5	0,4224	0,4432	0	0	0	0,1344	299,2416
13	45	-0,5	5	0,4155	0,4354	0	0,0184	0	0,1307	299,0973

Tableau 1 : propagateurs et température pour chaque point sonde du « wall »

On peut voir sur la dernière colonne du tableau la température (en Kelvin) de chacun des points sonde définis précédemment.

On peut ainsi remarquer que, selon la position du point sonde, l'influence des sources n'est pas la même. Les températures à gauche et à droite (LTEMP et RTEMP) jouent très rarement dans la balance tandis que les températures des grandes faces avant et arrière (FTEMP et BATEMP) jouent énormément. Cela s'explique notamment par la géométrie de la pièce, puisqu'elle est extrêmement fine (50x50x0,8mm) donc il est très rare pour un chemin aléatoire d'atteindre une des faces latérales.

Aussi, plus le point est localisé en bas du mur, plus il "verra" l'influence de la température du socle (BOTEMP) tandis que, plus il est localisé en haut du mur, plus il sera influencé par la température de la face supérieure (TTEMP). Cela explique pourquoi les seuls points dont la température est significativement différente de la température ambiante sont les points 11, 12 et 13 qui sont les 3 points sonde positionnées le plus bas de notre « wall ».

L'utilisation de Monte-Carlo Symbolique permettrait, au fur et à mesure de l'impression, de modéliser les phénomènes thermiques en tout point du filament, uniquement à partir des sources variant ou non en fonction du temps. Une fois le propagateur généré au préalable pour un certain point, le temps de calcul nécessaire pour déterminer sa température prend quelques millisecondes, ce qui rend possible l'usage de cette méthode pour une caractérisation de l'état thermique de la pièce en temps réel.

Là où notre Jumeau utilisé dans les chapitres 5 et 6 nous permettait uniquement d'avoir la température en un point de la pièce (le point de dépôt du filament), l'utilisation de Monte-Carlo Symbolique nous

permettrait d'avoir accès à plusieurs points sonde, et par interpolation, à la température de l'entière de la pièce.

6.4.3 Perspectives - Application en temps réel pendant l'impression d'une pièce

Par rapport au premier exemple donné précédemment, certaines modifications doivent être réalisées pour l'usage de MCS en temps réel dans notre cas d'application. En effet, nous nous sommes jusqu'ici intéressés à une géométrie constante, ce qui n'est pas le cas en réalité ici, puisque nous nous intéressons à l'étude d'une pièce pendant sa fabrication, ce qui veut dire que la géométrie de la pièce et la position des sources vont varier au cours du temps.

D'autre part, nous avons considéré jusqu'ici un coefficient de convection sur toutes les faces comme étant constant. Or, le coefficient de convection dépend notamment de la vitesse du ventilateur soufflant sur la pièce, ce qui implique un coefficient h qui va dépendre du temps, mais également de la position du ventilateur.

Enfin, dans notre cas, on ne se place bien sûr pas en régime stationnaire comme dans notre premier exemple. Il va donc falloir pour notre propagateur garder en mémoire les valeurs passées de toutes les sources et des paramètres variables comme le coefficient de convection.

Actuellement, le troisième point n'est pas un problème. Il est possible, à l'aide du logiciel¹² que nous utilisons pour Monte-Carlo Symbolique, de savoir quel nombre x de pas de temps chaque chemin composant un propagateur met pour atteindre une source, et donc, en allant chercher l'information de la température de cette source à l'instant t_{i-x} , de déterminer la température du point sonde à l'instant t_i .

Les premiers et seconds points sont, au moment où ce manuscrit est rédigé, des gaps dans la littérature, et nous travaillons actuellement avec une chercheuse spécialisée sur Monte-Carlo Symbolique pour résoudre ces blocages.

Notre approche est pour l'instant de découper notre pièce en deux (partie imprimée et partie non imprimée à un instant t) et de définir toute partie non imprimée comme étant un fluide avec le même

¹² <https://www.meso-star.com/projects/stardis/stardis.html> , consulté juin 2024

coefficient de convection que l'air ambiant. Ainsi on peut garder la même géométrie et les mêmes propagateurs pour tous nos calculs, ce qui est critique pour utiliser MCS.

Nous travaillons également sur le problème de positionnement des sources qui est variable au cours du temps. Une fois ce point résolu, il sera possible de faire des essais avec des données récoltées lors des expérimentations des chapitres 4 et 5 afin d'étudier le comportement thermique de la pièce en tout point.

Synthèse de nos contributions pour MCS

- Pour modéliser la température de la pièce pendant l'impression 3D, nous mesurons continuellement la température du filament extrudé avec des capteurs près de la buse. Ces données suivent l'évolution thermique du filament et des couches déposées. Nous avons débuté la mise en place de méthodes de Monte-Carlo Symbolique (MCS) pour modéliser en temps réel la température globale de la pièce à partir de ces données recueillies.
- L'objectif est d'utiliser la méthode MCS pour suivre la température de la pièce au cours du temps, en un point spécifique appelé « point sonde ». En multipliant ces points, il devient possible d'interpoler la température en tout point de la pièce.
- En couplant cette méthode à des modèles thermomécaniques pour caractériser la résistance mécanique de la liaison inter-couches en tout point de la pièce en temps-réel, notre but est de pouvoir contrôler le processus non pas avec une valeur arbitraire de température du filament comme cela a pu être fait dans le chapitre précédent, mais pour maximiser/optimiser ce paramètre mécanique.

6.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté un panorama des outils actuels utilisés pour la création de modèles structurels de produits dans le cadre de la fabrication additive. Bien que ces outils offrent une certaine efficacité, notre étude a identifié plusieurs contraintes spécifiques qui limitent leur utilisation dans notre contexte. En particulier, ces méthodes ne permettent pas d'intégrer les nuances thermiques nécessaires pour un contrôle précis du processus de fabrication additive.

Afin de pallier ces limitations, nous nous sommes tournés vers les méthodes de Monte-Carlo et de Monte-Carlo Symbolique. Ces méthodes ont démontré leur efficacité dans des contextes variés, notamment pour les études de transferts thermiques couplés conducto-convecto-radiatifs dans des

géométries complexes et fixes. Notre recherche s'est donc concentrée sur l'application de ces méthodes pour estimer avec précision la température locale d'une pièce imprimée en cours de fabrication.

Nous avons également proposé la construction d'une fonction rapide et précise, basée sur la méthode de Monte-Carlo Symbolique, pour estimer la température locale sur un intervalle de paramètres définis. Cette approche innovante permet non seulement d'améliorer la précision des estimations thermiques, mais aussi de simplifier les calculs complexes associés à ces processus.

L'objectif de notre démarche est de développer des modèles thermomécaniques qui intègrent les informations en temps réel fournies par la méthode de Monte-Carlo Symbolique. Cela nous permet de réévaluer et de renforcer les conclusions du chapitre précédent, cette fois avec une valeur de température précise et physiquement significative du filament, au lieu d'utiliser une température arbitraire comme cela a été le cas dans les chapitres précédents. Cette précision accrue permet d'optimiser le processus de fabrication additive, garantir la qualité du produit final et accroître l'efficacité globale du processus.

CONCLUSION GENERALE

Ce manuscrit de thèse a exploré de manière exhaustive le Paradigme du Système Contrôlé par le Produit (SCP) et son application dans le domaine de la fabrication additive au sein d'un processus de conception et de fabrication pour une approche Do-It-Together (DIT), en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation des Jumeaux Numériques pour améliorer la collaboration et le contrôle des processus de production en temps réel. L'objectif, dicté par le projet INEDIT, est pour un consommateur de pouvoir co-concevoir de manière collaborative un produit personnalisé, en utilisant des moyens locaux (infrastructure, matériaux, acteurs), dans des délais minimums, permis grâce à l'utilisation d'un circuit local. Dans ce sens, cette thèse a montré comment, grâce à l'usage d'un Jumeau Numérique, l'ingénierie collaborative peut établir une connectivité entre le produit et ses informations, pour lui conférer un rôle d'orchestrateur de sa propre fabrication et de vérifier et valider ses exigences de conception. À travers les différents chapitres, nous avons abordé les défis et les solutions pour mettre en œuvre cet écosystème de fabrication collaboratif centré sur le produit.

Dans le **chapitre 1**, nous avons démontré l'efficacité du DIT à une échelle locale, comme celle d'un fablab. Cependant, nous avons également identifié les obstacles à surmonter pour rendre ce processus opérationnel dans un écosystème plus large. Nous avons souligné la nécessité d'une intégration complète des différentes phases du projet et la reconnaissance de la valeur de la collaboration tout au long du processus de fabrication. Pour répondre à cette problématique, **nous avons introduit l'idée d'un suivi virtuel du produit, tout au long de sa conception et de sa fabrication, permettant aux différents acteurs de suivre et d'interagir avec le produit en temps réel**. Cela nous a permis de définir notre problématique, à savoir mettre en place un objet virtuel capable de représenter fidèlement et de communiquer avec le produit, en temps réel, tout au long de sa fabrication, afin de rendre le produit acteur de sa fabrication.

Le **chapitre 2** s'est intéressé à la possibilité d'employer un tel outil pour permettre un suivi du produit et une interaction multi-acteurs avec lui pendant la phase de fabrication, en observant un outil en particulier, le Jumeau Numérique. Nous avons approfondi la notion de Jumeau Numérique, mettant en lumière ses capacités et ses limites en tant qu'outil de collaboration. Une première contribution, proposée sous forme de papier de conférence, a été de proposer une classification des Jumeaux Numériques en fonction de leurs échanges avec le produit et de leur interopérabilité. Cela nous a permis de définir plus précisément ce qu'est un Jumeau Numérique et d'analyser comment il peut favoriser la collaboration dans le cadre de la conception et de la fabrication. Une seconde contribution, restituée sous la forme d'un article scientifique (Annexe 5), présentée dans ce chapitre a été la

réalisation d'un état de l'art des applications du Jumeau Numérique, qui nous a permis également d'identifier les limites de son utilisation pour observer et interagir avec le produit durant la fabrication. En effet, nous avons pu observer que seuls 19% des « Jumeaux Numériques » présentés dans la littérature permettait un contrôle direct ou indirect de leur homologue physique, et que les applications des Jumeaux étaient très concentrées sur des applications spécifiques (maintenance prédictive et contrôle de la fabrication), mais toujours avec une observation de la machine et jamais du produit fabriqué. Ce constat a conduit à la réflexion sur l'importance de l'observabilité du produit en temps réel, pour permettre une communication efficace entre les acteurs et un contrôle continu du produit en phase de fabrication.

Dans le **chapitre 3**, nous avons exploré les concepts de produits intelligents et de systèmes contrôlés par le produit (SCP). **Nous avons démontré comment l'observabilité des produits, via le Jumeau Numérique, peut transformer la gestion des flux de production et améliorer les processus de fabrication en temps réel.** Nous avons mis en avant l'importance de cette observabilité pour la gestion efficace des flux de produits et pour le contrôle en temps réel de la production. **Une contribution de ce chapitre a également été la proposition d'un modèle en oignon permettant la mise en place d'un Jumeau Numérique pour permettre un contrôle en temps réel d'un processus de fabrication par le produit fabriqué.** Après la présentation de ce modèle, l'objectif principal de la suite de cette thèse a été de démontrer son utilisation à travers un cas d'application impliquant un produit fabriqué par impression 3D FFF. Ce procédé de fabrication a été choisi en raison de son caractère ouvert et de son rôle facilitateur dans les démarches collaboratives.

Le **chapitre 4** s'est intéressé à la mise en place des premières couches de ce modèle, à savoir implémenter un *Digital Shadow* permettant une observabilité en temps réel de l'état du produit fabriqué au cours du processus de fabrication. Dans ce cadre, **nous nous sommes concentrés sur l'observabilité des phénomènes thermiques impliqués dans l'impression 3D, identifiant les variables clés à observer pour garantir la qualité des liaisons inter-couches et, par extension, la résistance mécanique de la pièce finale.** Ce chapitre a permis de construire un premier Jumeau Numérique de l'objet imprimé, en utilisant une caméra thermique pour suivre la température du filament extrudé. Cette première étape d'observabilité a mis en évidence la nécessité de développer un véritable *Digital Twin*, capable de contrôler le processus de fabrication en temps réel.

Pour ce faire, dans le **chapitre 5**, **nous avons implémenté un asservissement de la température d'extrusion dans une imprimante 3D FFF basé sur l'état du produit.** En utilisant un modèle dynamique et un contrôleur PID en temps réel, nous avons amélioré la précision et la qualité des impressions. Cette contribution a validé l'application du Jumeau Numérique pour le contrôle en temps réel, en

montrant comment les données issues de l'observation du produit en temps réel peuvent être utilisées pour optimiser les performances de l'imprimante et satisfaire les exigences de conception.

Enfin, dans le **chapitre 6**, nous avons cherché à déterminer comment nous pourrions estimer avec précision la température locale d'une pièce imprimée en cours de fabrication, intégrant des informations en temps réel pour développer des modèles thermomécaniques. Dans ce cadre, **nous avons exploré l'emploi de méthodes avancées de modélisation thermique, telles que les méthodes de Monte-Carlo et Monte-Carlo Symbolique**. Cette méthode, et notamment Monte Carlo Symbolique, apparaît comme un outil prometteur pour l'observabilité en temps réel des phénomènes thermiques de l'ensemble du produit tout au long du processus de fabrication. Le possible emploi de ces modèles thermomécaniques renforce les conclusions des chapitres précédents en fournissant des estimations précises et physiquement significatives de la température du filament, optimisant ainsi le processus de fabrication additive.

Nous avons également relevé les limites de notre approche actuelle. En effet, nous utilisons encore actuellement le modèle de l'imprimante fabriquant le produit pour notre commande par le produit. Cela limite la démocratisation de notre Jumeau Numérique, puisque l'adaptation à une nouvelle imprimante, ou à un nouveau procédé de fabrication en général, demande une connaissance du fonctionnement interne de ce procédé. De plus, notre application telle qu'elle est réalisée actuellement ne permet pas l'impression contrôlée de produits en trois dimensions, ce qui va nécessiter une adaptation de notre approche pour pouvoir réaliser des tests plus poussés, notamment des essais mécaniques.

En perspective de ces travaux de recherche, nous souhaitons explorer l'implémentation de la Commande Sans Modèle (CSM) au sein du laboratoire. Nous envisageons d'élaborer et adapter des algorithmes de commande sans modèle pour les processus de fabrication additive, et étudier comment la CSM peut être intégrée avec les Jumeaux Numériques pour améliorer la précision et la réactivité du contrôle en temps réel. Le Jumeau Numérique fournira les données en temps réel nécessaires pour la commande sans modèle, permettant ainsi une régulation adaptative et réactive du processus de fabrication. En intégrant cette approche avec les Jumeaux Numériques, nous visons à créer des systèmes de contrôle robustes, capables de gérer les complexités et les incertitudes inhérentes aux processus de production modernes. Ce futur travail de recherche constituera une extension naturelle des résultats obtenus dans cette thèse, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances et des technologies dans le domaine de la fabrication collaborative et intelligente. Nous avons également commencé à travailler sur l'adaptation de notre système de contrôle pour permettre l'observabilité de la température du produit extrudé et sa résistance mécanique lors d'une impression d'un produit en

trois dimensions, à travers notamment l'usage de modèles thermomécaniques et de la méthode de Monte Carlo Symbolique.

En conclusion générale, cette thèse a établi une approche méthodologique cohérente et interconnectée pour répondre à la problématique générale de l'intégration et de l'observabilité dans un écosystème de fabrication collaboratif distribué. Chaque chapitre a contribué à la construction d'un cadre dans lequel le Jumeau Numérique joue un rôle central pour améliorer la collaboration, l'observabilité et le contrôle en temps réel dans la fabrication additive. Les travaux réalisés ouvrent la voie à des applications futures plus avancées, intégrées et efficaces, permettant de pleinement exploiter le potentiel du paradigme du Système Contrôlé par le Produit en temps réel.

Le SCP, appliqué dans notre travail à travers le Jumeau Numérique, apparaît comme une solution pertinente pour renforcer une approche DIT en permettant une interaction du produit avec un système de production en temps réel. En effet, les différentes « couches » de Jumeau Numérique correspondent aux différentes étapes nécessaires pour faire d'un produit un produit intelligent, actif, et architecte de sa fabrication. Comme nous l'avons montré dans ce travail de thèse, cela implique de réaliser un Jumeau Numérique du produit et non du process de fabrication, ce qui complète avantageusement une grande majorité des applications proposées dans la littérature pour le contrôle des processus de fabrication. Néanmoins, il ne faut pas tomber dans le piège, comme cela peut parfois être le cas dans l'industrie et la littérature, de considérer pour notre contexte le Jumeau Numérique comme une panacée. Ces travaux de recherche ont mis en évidence que l'observabilité d'un seul critère de conception du produit comme la résistance mécanique nécessitait bien plus qu'uniquement un Jumeau Numérique. Cela nécessite une connaissance poussée des interactions multiphysiques intrinsèques au produit étudié, et demande la mise en place de technologies complexes pour lesquelles des barrières existent encore avant de pouvoir être appliquées, de surcroît en temps réel. Pour aller plus loin dans le développement du couple {Jumeau Numérique/Produit}, il faut aller plus loin dans les méthodes de contrôle, notamment à travers la CSM, pour se laisser guider par les phénomènes à l'origine des transformations physiques du produit.

BIBLIOGRAPHIE

Agnusdei, G.P., Elia, V. and Gnoni, M.G. (2021) 'A classification proposal of digital twin applications in the safety domain', *Computers and Industrial Engineering*, 154(December 2020), p. 107137. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107137>.

Aliheidari, N., Christ, J., Tripuraneni, R., Nadimpalli, S. and Ameli, A. (2018) 'Interlayer adhesion and fracture resistance of polymers printed through melt extrusion additive manufacturing process', *Materials and Design*, 156, pp. 351–361. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.001>.

Alizadehsalehi, S. and Yitmen, I. (2021) 'Digital twin-based progress monitoring management model through reality capture to extended reality technologies (DRX)', *Smart and Sustainable Built Environment* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2021-0016>.

Atkinson, P. (2006) 'Do it yourself: Democracy and design', *Journal of Design History*, 19(1), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.1093/jdh/epk001>.

Attaran, M. (2017) 'The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing', *Business Horizons*, 60(5), pp. 677–688. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.

Baina, S., Panetto, H. and Morel, G. (2009) 'New paradigms for a product oriented modelling: Case study for traceability', *Computers in Industry*, 60(3), pp. 172–183. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2008.12.004>.

Balletti, C., Ballarin, M. and Guerra, F. (2017) '3D printing: State of the art and future perspectives', *Journal of Cultural Heritage*, 26, pp. 172–182. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>.

Barocio, E., Brenken, B., Favaloro, A. and Pipes, R.B. (2022) 'Interlayer fusion bonding of semi-crystalline polymer composites in extrusion deposition additive manufacturing', *Composites Science and Technology*, 230(P2), p. 109334. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109334>.

Barricelli, B.R., Casiraghi, E. and Fogli, D. (2019) 'A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications', *IEEE Access*, 7, p. 1. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>.

Basgul, C., Thieringer, F.M. and Kurtz, S.M. (2021) 'Heat transfer-based non-isothermal healing model for the interfacial bonding strength of fused filament fabricated polyetheretherketone', *Additive Manufacturing*, 46(May), p. 102097. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102097>.

Bellini, A. (2002) *Fused deposition of ceramics: A comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design*, Dissertation. Drexel University.

Bellini, A., Güçeri, S. and Bertoldi, M. (2004) 'Liquefier dynamics in fused deposition', *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(2), pp. 237–246. Available at: <https://doi.org/10.1115/1.1688377>.

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S. and Rezgui, Y. (2020) 'Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research', *Automation in Construction*, 114(January), p. 103179. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>.

Boujut, J.-F. and Blanco, E. (2003) 'Intermediary Objects as a Means to Foster Co-operation in Engineering Design', *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 12(2), pp. 205–219. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1023980212097>.

Bouzid, S., Viarouge, P. and Cros, J. (2020) 'Real-time digital twin of a wound rotor induction machine based on finite element method', *Energies*, 13(20). Available at: <https://doi.org/10.3390/en13205413>.

Bräuer, G., Sachsenhofer, K. and Lang, R.W. (2021) 'Material and process engineering aspects to improve the quality of the bonding layer in a laser-assisted fused filament fabrication process', *Additive Manufacturing*, 46(August 2020). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102105>.

Brenken, B., Barocio, E., Favaloro, A., Kunc, V. and Pipes, R.B. (2019) 'Development and validation of extrusion deposition additive manufacturing process simulations', *Additive Manufacturing*, 25(June 2018), pp. 218–226. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.041>.

Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L. and Peeters, P. (1998) 'Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA', *Computers in Industry*, 37(3), pp. 255–274. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(98\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(98)00102-X).

Cao, X., Zhao, G. and Xiao, W. (2020) 'Digital Twin-oriented real-time cutting simulation for intelligent computer numerical control machining', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(1–2), pp. 5–15. Available at: <https://doi.org/10.1177/0954405420937869>.

Castro Espiritu, E., Mayer, F. and Lhoste, P. (2008) 'Contribution to the Formalization of Individualized Processes during Product Innovation', *3rd European Conference on Management of Technology, EUROMOT*, 8, p. 200.

Chang, T.C., Wysk, R.A. and Wang, H.P. (1998) *Computer-aided Manufacturing*. Prentice Hall (Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering). Available at: <https://books.google.fr/books?id=0uxTAAAMAAJ>.

Cheng, J., Zhang, H., Tao, F. and Juang, C.F. (2020) 'DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 62(October 2019), p. 101881. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101881>.

Chuang, W., Guanghui, Z. and Junsheng, W. (2021) 'Smart cyber-physical production system enabled workpiece production in digital twin job shop', *Advances in Mechanical Engineering*, 13(9), pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1177/16878140211040888>.

Cimino, C., Negri, E. and Fumagalli, L. (2019) 'Review of digital twin applications in manufacturing', *Computers in Industry*, 113, p. 103130. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>.

Colon, A.R., Kazmer, D.O., Peterson, A.M. and Seppala, J.E. (2023) 'Characterization of die-swell in thermoplastic material extrusion', *Additive Manufacturing*, 73(February), p. 103700. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103700>.

Cruz Sanchez, F.A., Boudaoud, H., Camargo, M. and Pearce, J.M. (2020) 'Plastic recycling in additive

manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy', *Journal of Cleaner Production*, 264(April). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>.

Cruz Sanchez, F.A., Boudaoud, H., Muller, L. and Camargo, M. (2014) 'Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing: This paper proposes a benchmarking model for evaluating accuracy performance of 3D printers', *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), pp. 151–167. Available at: <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.919553>.

D'Amico, A. and Peterson, A.M. (2018) 'An adaptable FEA simulation of material extrusion additive manufacturing heat transfer in 3D', *Additive Manufacturing*, 21(June 2017), pp. 422–430. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.021>.

Damoah, I.S. and Botchie, D. (2021) 'Do-It-Yourself (DIY) laboratories and science, technology, and innovation (STI): trends, implications and future research', *Technology Analysis and Strategic Management*, 33(10), pp. 1267–1280. Available at: <https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1942826>.

Deebak, B.D. and Al-Turjman, F. (2021) 'Digital-twin assisted: Fault diagnosis using deep transfer learning for machining tool condition', *International Journal of Intelligent Systems*, (April), pp. 1–28. Available at: <https://doi.org/10.1002/int.22493>.

Deshpande, A., Ravi, A., Kusel, S., Churchwell, R. and Hsu, K. (2019) 'Interlayer thermal history modification for interface strength in fused filament fabricated parts', *Progress in Additive Manufacturing*, 4(1), pp. 63–70. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0063-1>.

Dunn, W.L. (1983) 'Inverse Monte Carlo solutions for radiative transfer in inhomogeneous media', *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 29(1), pp. 19–26. Available at: [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(83\)90141-3](https://doi.org/10.1016/0022-4073(83)90141-3).

Dunn, W.L. and Shultis, J.K. (2012) *Exploring Monte Carlo Methods*, Elsevier. Available at: [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(12\)70027-5](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(12)70027-5).

Dupont, L. (2024) *Projet européen LAUDS Factories (extrait)*.

Dupont, L., Caceres, C., Arbelaiz, G. and Fleury, S. (2023) 'Innovative User eXperience approach for the design of a multi-sided platform', *Proceedings of the 29th International Conference on Engineering, Technology, and Innovation: Shaping the Future, ICE 2023* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC58018.2023.10332326>.

Dupont, L., Gabriel, A., Camargo, M. and Guidat, C. (2017) 'Collaborative innovation projects engaging open communities: A case study on emerging challenges', *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation: Engineering, Technology and Innovation Management Beyond 2020: New Challenges, New Approaches, ICE/ITMC 2017 - Proceedings*, 2018-Janua(June), pp. 1082–1091. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280002>.

Dupont, L., Kasmi, F., Pearce, J.M. and Ortt, R.J. (2023) "'Do-It-Together" and Innovation: Transforming European Industry', *Journal of Innovation Economics & Management*, N° 40(1), pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.3917/jie.040.0001>.

Dupont, L., Kasmi, F., Pearce, J.M.M., Ortt, R., Dupont, L., Kasmi, F., Pearce, J.M.M. and Ortt, R. (2021) "'Do-It-Together": Towards the Factories of the Future. José Ramos; Sharon Ede; Michel Bauwens; James Gien Wong.', *Cosmo-Local Reader, Futures Lab*, pp. 52–59. Available at: hal-03506100.

Dupont, L., Morel, L., Hubert, J. and Guidat, C. (2014) 'Study case: Living Lab Mode for urban project

design: Emergence of an ad hoc methodology through collaborative innovation', *2014 International Conference on Engineering, Technology and Innovation: Engineering Responsible Innovation in Products and Services, ICE 2014* [Preprint], (June). Available at: <https://doi.org/10.1109/ICE.2014.6871550>.

Fliess, M. and Join, C. (2009) 'Commande sans modèle et commande à modèle restreint', *e-STA Sciences et Technologies de l'Automatique*, 5(4), pp. 1–23.

Fliess, M. and Join, C. (2013) 'Model-free control', *International Journal of Control*, 86(12), pp. 2228–2252. Available at: <https://doi.org/10.1080/00207179.2013.810345>.

Fox, S. (2014) 'Third Wave Do-It-Yourself (DIY): Potential for prosumption, innovation, and entrepreneurship by local populations in regions without industrial manufacturing infrastructure', *Technology in Society*, 39, pp. 18–30. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2014.07.001>.

Fuller, A., Fan, Z., Day, C. and Barlow, C. (2020) 'Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research', *IEEE Access*, 8(May), pp. 108952–108971. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.

Gabriel, A., Monticolo, D., Camargo, M. and Bourgault, M. (2016) 'Creativity support systems: A systematic mapping study', *Thinking Skills and Creativity*, 21, pp. 109–122. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2016.05.009>.

Gao, X., Yu, N. and Li, J. (2020) *Influence of printing parameters and filament quality on structure and properties of polymer composite components used in the fields of automotive, Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components*. Elsevier Inc. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819535-2.00010-7>.

Garmabi, M.M., Shahi, P., Tjong, J. and Sain, M. (2022) '3D printing of polyphenylene sulfide for functional lightweight automotive component manufacturing through enhancing interlayer bonding', *Additive Manufacturing*, 56(March), p. 102780. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102780>.

Garzon-Hernandez, S., Garcia-Gonzalez, D., Jérusalem, A. and Arias, A. (2020) 'Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties', *Materials and Design*, 188. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108414>.

Gauntlett, D. (2011) *Making is Connecting*. Edited by Polity. Wiley. Available at: <https://books.google.fr/books?id=DGW0tLoxqUsC>.

Geng, Z. and Bidanda, B. (2021) 'Geometric precision analysis for Additive Manufacturing processes: A comparative study', *Precision Engineering*, 69(January), pp. 68–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.12.022>.

Glaessgen, E.H. and Stargel, D.S. (2012) 'The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles', *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>.

González García, C., Meana Llorián, D., Pelayo G-Bustelo, C. and Cueva-Lovelle, J.M. (2017) 'A review about Smart Objects, Sensors, and Actuators', *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 4(3), p. 7. Available at: <https://doi.org/10.9781/ijimai.2017.431>.

Goupy, J. (2005) 'What kind of experimental design for finding and checking robustness of analytical

methods?', *Analytica Chimica Acta*, 544(1-2 SPEC. ISS.), pp. 184–190. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.01.051>.

Grieves, M. (2014) 'Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication', *A Whitepaper*, (November), p. 9. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1493930>.

Grieves, M. (2016) 'Origins of the Digital Twin Concept', *Revista de obstetricia y ginecología de Venezuela*, 23(August), pp. 889–896. Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>.

Gunasegaram, D.R., Murphy, A.B., Barnard, A., DebRoy, T., Matthews, M.J., Ladani, L. and Gu, D. (2021) 'Towards developing multiscale-multiphysics models and their surrogates for digital twins of metal additive manufacturing', *Additive Manufacturing*, 46(May). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102089>.

Guo, L., Cheng, Y., Zhang, Y., Liu, Y., Wan, C. and Liang, J. (2021) 'Development of Cloud-Edge Collaborative Digital Twin System for FDM Additive Manufacturing', *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2021-July(January), pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1109/INDIN45523.2021.9557492>.

Hakken, D. (1996) 'Democratizing technology : Pleasure, Utility and Expressiveness in DIY and Maker Practice', *Science as Culture*, 6(1), pp. 149–152. Available at: <https://doi.org/10.1080/09505439609526460>.

He, R., Chen, G., Dong, C., Sun, S. and Shen, X. (2019) 'Data-driven digital twin technology for optimized control in process systems', *ISA Transactions*, 95(May), pp. 221–234. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.05.011>.

Hebda, M., McIlroy, C., Whiteside, B., Caton-Rose, F. and Coates, P. (2019) 'A method for predicting geometric characteristics of polymer deposition during fused-filament-fabrication', *Additive Manufacturing*, 27(January), pp. 99–108. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.013>.

Helsel, M.A., Popovics, J.S., Stynoski, P.B. and Kreiger, E. (2021) 'Non-destructive testing to characterize interlayer bonds of idealized concrete additive manufacturing products', *NDT and E International*, 121(March), p. 102443. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102443>.

Hirscher, A.L., Niinimäki, K. and Joyner Armstrong, C.M. (2018) 'Social manufacturing in the fashion sector: New value creation through alternative design strategies?', *Journal of Cleaner Production*, 172, pp. 4544–4554. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.020>.

Huang, G.Q., Wright, P.K. and Newman, S.T. (2009) 'Wireless manufacturing: A literature review, recent developments, and case studies', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(7), pp. 579–594. Available at: <https://doi.org/10.1080/09511920701724934>.

Huang, G.Q., Zhang, Y.F., Chen, X. and Newman, S.T. (2008) 'RFID-enabled real-time wireless manufacturing for adaptive assembly planning and control', *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(6), pp. 701–713. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0121-5>.

Huang, G.Q., Zhang, Y.F. and Jiang, P.Y. (2007) 'RFID-based wireless manufacturing for walking-worker assembly islands with fixed-position layouts', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(4), pp. 469–477. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2006.05.006>.

Huang, G.Q., Zhang, Y.F. and Jiang, P.Y. (2008) 'RFID-based wireless manufacturing for real-time management of job shop WIP inventories', *International Journal of Advanced Manufacturing*

Technology, 36(7–8), pp. 752–764. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0897-4>.

Hutchinson, M., O'Donohue, A., Eslami, B. and Fouladi, K. (2024) 'Numerical and experimental analysis of 3D printer hot ends', *Discover Applied Sciences*, 6(5). Available at: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05884-4>.

Ibarrart, L., Blanco, S., Caliot, C. and others (2022) 'Advection, diffusion and linear transport in a single path-sampling Monte-Carlo algorithm: getting insensitive to geometrical refinement', <https://Hal.Science/Hal-03818899> [Preprint].

Irshad, M. and Ali, A. (2018) 'Optimal tuning rules for PI/PID controllers for inverse response processes', *IFAC-PapersOnLine*, 51(1), pp. 413–418. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.05.063>.

Jaisingh Sheoran, A. and Kumar, H. (2019) 'Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research', *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.296>.

Julien, N. and Martin, E. (2021) 'How to characterize a digital twin: A usage-driven classification', *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), pp. 894–899. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.106>.

Julien, N. and Martin, E. (2022) 'Typology of Manufacturing Digital Twins: A First Step Towards a Deployment Methodology', *Studies in Computational Intelligence*, 1034(June), pp. 161–172. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-99108-1_12.

Kaarlela, T., Pieska, S., Pitkaaho, T., Solvang, W.D., Shu, B., Arnarson, H. and Solvang, B. (2022) 'Robot cell digital twins as a tool for remote collaboration between organizations', in *2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE, pp. 766–771. Available at: <https://doi.org/10.1109/SII52469.2022.9708902>.

Kac, M. (1947) 'Random Walk and the Theory of Brownian Motion', *The American Mathematical Monthly*, 54(7), p. 369. Available at: <https://doi.org/10.2307/2304386>.

Kac, M. (1949) 'On Distributions of Certain Wiener Functionals', *Transactions of the American Mathematical Society*, 65(1), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.2307/1990512>.

Kac, M. (1951) 'On Some Connections between Probability Theory and Differential and Integral Equations', in *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. University of California Press, pp. 189–216. Available at: <https://doi.org/10.1525/9780520411586-016>.

Kalman, R.E. (1959) 'On the general theory of control systems', *IRE Transactions on Automatic Control*, p. 110. Available at: <https://doi.org/10.1109/TAC.1959.1104873>.

Kantaros, A., Giannatsis, J. and Karalekas, D. (2013) 'A novel strategy for the incorporation of optical sensors in Fused Deposition Modeling parts', *International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies* [Preprint], (October).

Kantaros, A., Piromalis, D., Tsaramirsis, G., Papageorgas, P. and Tamimi, H. (2022) '3D Printing and Implementation of Digital Twins: Current Trends and Limitations', *Applied System Innovation*, 5(1), pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.3390/asi5010007>.

Kärkkäinen, M., Holmström, J., Främling, K. and Artto, K. (2003) 'Intelligent products - A step towards a more effective project delivery chain', *Computers in Industry*, 50(2), pp. 141–151. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(02\)00116-1](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(02)00116-1).

Kasmi, F., Marche, B., Dupont, L., Mayer, F., Pallot, M. and Leiting, T. (2021) 'Design of the Do It Together approach. INEDIT Project - Deliverable 2.2, European Union's Horizon 2020 research and innovation programme', p. 85. Available at: [hal-04257057](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04257057).

Kasmi, F., Osorio, F., Dupont, L., Marche, B. and Camargo, M. (2022) 'Innovation Spaces as Drivers of Eco-innovations Supporting the Circular Economy: A Systematic Literature Review', *Journal of Innovation Economics and Management*, 39(3), pp. 172–214. Available at: <https://doi.org/10.3917/jie.pr1.0113>.

Koszkul, J. and Nabialek, J. (2004) 'Viscosity models in simulation of the filling stage of the injection molding process', *Journal of Materials Processing Technology*, 157–158(SPEC. ISS.), pp. 183–187. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.027>.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. and Sihn, W. (2018) 'Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification', *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), pp. 1016–1022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.

Külschbach, A., Leiting, T. and Stich, V. (2020) 'Do-it-Together Concept for Production Ecosystems', in *1st Conference on Production Systems and Logistics*, pp. 369–376.

Kusiak, A. (2020) 'Open manufacturing: a design-for-resilience approach', *International Journal of Production Research*, 58(15), pp. 4647–4658. Available at: <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1770894>.

Landaluce, H., Arjona, L., Perallos, A., Falcone, F., Angulo, I. and Muralter, F. (2020) 'A review of iot sensing applications and challenges using RFID and wireless sensor networks', *Sensors (Switzerland)*, 20(9), pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.3390/s20092495>.

Lee, D. and Lee, S. (2021) 'Digital twin for supply chain coordination in modular construction', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(13). Available at: <https://doi.org/10.3390/app11135909>.

Leitão, P., Colombo, A.W. and Karnouskos, S. (2016) 'Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges', *Computers in Industry*, 81, pp. 11–25. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.08.004>.

Leng, J., Yan, D., Liu, Q., Zhang, H., Zhao, G., Wei, L., Zhang, D., Yu, A. and Chen, X. (2021) 'Digital twin-driven joint optimisation of packing and storage assignment in large-scale automated high-rise warehouse product-service system', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(7–8), pp. 783–800. Available at: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1667032>.

Li, C., Cheng, W. and Hu, J. (2018) 'Nozzle Problem Analysis and Optimization of FDM 3D Printer', *Proceedings of the 2017 7th International Conference on Mechatronics, Computer and Education Informationization (MCEI 2017)*, 75(Mcei), pp. 270–273. Available at: <https://doi.org/10.2991/mcei-17.2017.59>.

Li, Z., Wang, W.M., Liu, G., Liu, L., He, J. and Huang, G.Q. (2018) 'Toward open manufacturing a cross-enterprises knowledge and services exchange framework based on blockchain and edge computing', *Industrial Management and Data Systems*, 118(1), pp. 303–320. Available at: <https://doi.org/10.1108/IMDS-04-2017-0142>.

Liu, M., Fang, S., Dong, H. and Xu, C. (2020) 'Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications', *Journal of Manufacturing Systems*, (June), pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>.

Liu, Q., Zhang, H., Leng, J. and Chen, X. (2019) 'Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system', *International Journal of Production Research*, 57(12), pp. 3903–3919. Available at: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471243>.

Liu, Y.Y., Slotine, J.J. and Barabási, A.L. (2013) 'Observability of complex systems', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(7), pp. 2460–2465. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1215508110>.

Lo, C.K., Chen, C.H. and Zhong, R.Y. (2021) 'A review of digital twin in product design and development', *Advanced Engineering Informatics*, 48(March 2021). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>.

Long, K. (2023) 'FDM 3D printer temperature control system based on PID control', *Applied and Computational Engineering*, 28(1), pp. 72–79. Available at: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/28/20230129>.

Lovell, J. and Kluger, J. (1994) *Lost Moon: The Perilous Voyage of Apollo 13*. Houghton M.

Lu, Y. and Wang, Y. (2018) 'Monitoring temperature in additive manufacturing with physics-based compressive sensing', *Journal of Manufacturing Systems*, 48(December 2017), pp. 60–70. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.05.010>.

Madni, A., Madni, C. and Lucero, S. (2019) 'Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering', *Systems*, 7(1), p. 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/systems7010007>.

Maranzana, N., Gartiser, N. and Caillaud, E. (2008) 'From concurrent engineering to collaborative learning of design', *International Journal of Design and Innovation Research*, 4(November), pp. 39–51. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00690988>.

Marche, B., Boly, V., Morel, L., Camargo, M. and Ortt, J.R. (2017) 'Overview of phenomena occurring in supply chains during the emergence of innovation', *Supply Chain Forum*, 18(3), pp. 150–165. Available at: <https://doi.org/10.1080/16258312.2017.1354649>.

Marche, B., Boly, V., Morel, L., Mayer, F. and Ortt, R. (2019) 'Agility and product supply chain design: The case of the Swatch', *Journal of Innovation Economics and Management*, 1(28), pp. 79–109. Available at: <https://doi.org/10.3917/jie.028.0079>.

Marche, B., Kasmi, F., Mayer, F. and Dupont, L. (2023) 'Implementing Do-It-Together: The Cross-fertilization of Do-It-Yourself and Open Manufacturing', *Journal of Innovation Economics and Management*, 40(1), pp. 13–38. Available at: <https://doi.org/10.3917/jie.pr1.0122>.

Mayer, F. (2023) *Contribution à la dynamique d'une situation-système contrôlée par le produit circulant*. Université de Lorraine.

McFarlane, D. (2003) 'Product identity and its impact on discrete event observability', *European Control Conference, ECC 2003*, (December), pp. 121–132. Available at: <https://doi.org/10.23919/ecc.2003.7084942>.

McFarlane, D., Giannikas, V. and Lu, W. (2016) 'Intelligent logistics: Involving the customer', *Computers*

in Industry, 81, pp. 105–115. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.10.002>.

McFarlane, D., Giannikas, V., Wong, A.C.Y. and Harrison, M. (2013) 'Product intelligence in industrial control: Theory and practice', *Annual Reviews in Control*, 37(1), pp. 69–88. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2013.03.003>.

McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J.L., Wong, C.Y. and Ashton, K. (2003) 'Auto ID systems and intelligent manufacturing control', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4), pp. 365–376. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(03\)00077-0](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(03)00077-0).

Mellor, S., Hao, L. and Zhang, D. (2014) 'Additive manufacturing: A framework for implementation', *International Journal of Production Economics*, 149, pp. 194–201. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.008>.

Meyer, G.G., Främling, K. and Holmström, J. (2009) 'Intelligent Products: A survey', *Computers in Industry*, 60(3), pp. 137–148. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2008.12.005>.

Michopoulos, J.G., Iliopoulos, A.P., Steuben, J.C., Birnbaum, A.J. and Lambrakos, S.G. (2018) 'On the multiphysics modeling challenges for metal additive manufacturing processes', *Additive Manufacturing*, 22(February 2015), pp. 784–799. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.019>.

Mir-Nasiri, N., Ali, M.H. and Kurokawa, S. (2015) 'Development of 3D printer with integrated temperature control system', *2015 4th International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2015* [Preprint], (March). Available at: <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2015.7333996>.

Mohamed, O.A., Masood, S.H. and Bhowmik, J.L. (2017) 'Experimental investigation of creep deformation of part processed by fused deposition modeling using definitive screening design', *Additive Manufacturing*, 18, pp. 164–170. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.013>.

Mohan, N., Senthil, P., Vinodh, S. and Jayanth, N. (2017) 'A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process', *Virtual and Physical Prototyping*. Taylor and Francis Ltd., pp. 47–59. Available at: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1274490>.

Monticolo, D., Mihaita, S., Darwich, H. and Hilaire, V. (2014) 'An agent-based system to build project memories during engineering projects', *Knowledge-Based Systems*, 68, pp. 88–102. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.12.022>.

Morel, G., Panetto, H., Mayer, F., Auzelle, J., Morel, G., Panetto, H., Mayer, F. and Enterprise-systems, J.A.S. (2009) 'System of Enterprise-Systems Integration Issues : an Engineering Perspective To cite this version : HAL Id : hal-00168535'.

Morel, G., Pereira, C.E. and Nof, S.Y. (2019) 'Historical survey and emerging challenges of manufacturing automation modeling and control: A systems architecting perspective', *Annual Reviews in Control*, 47(xxxx), pp. 21–34. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.01.002>.

Moretti, M., Rossi, A. and Senin, N. (2021) 'In-process monitoring of part geometry in fused filament fabrication using computer vision and digital twins', *Additive Manufacturing*, 37(January 2020), p. 101609. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101609>.

Negri, E., Fumagalli, L. and Macchi, M. (2017) 'A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems', *Procedia Manufacturing*, 11(June), pp. 939–948. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>.

Osorio, F., Dupont, L., Camargo, M., Palominos, P., Osorio, F., Dupont, L., Camargo, M., Palominos, P., Peña, J.I., Osorio, F., Dupont, L., Camargo, M., Palominos, P. and Peña, J.I. (2019) 'Design and management of innovation laboratories : Toward a performance assessment tool To cite this version : HAL Id : hal-01987047 Design and Management of Innovation Laboratories : Towards a Performance Assessment Tool', *Journal of Creativity and Innovation Management*, 28(1), pp. 82–100.

Osswald, T.A., Puentes, J. and Kattinger, J. (2018) 'Fused filament fabrication melting model', *Additive Manufacturing*, 22(October 2017), pp. 51–59. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.030>.

Pallot, M., Fleury, S., Poussard, B. and Richir, S. (2023) *What are the Challenges and Enabling Technologies to Implement the Do-It-Together Approach Enhanced by Social Media, its Benefits and Drawbacks?*, *Journal of Innovation Economics & Management*. Available at: <https://doi.org/10.3917/jie.pr1.0132>.

Pandey, A. and Pradhan, S.K. (2018) 'Investigations into Complete Liquefier Dynamics and Optimization of Process Parameters for Fused Deposition Modeling', *Materials Today: Proceedings*, 5(5), pp. 12940–12955. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.279>.

Paper, C. and Prendeville, S. (2017) 'Design Principles for Do-It-Yourself Production', (April), pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57078-5>.

Pearce, J. and Qian, J.-Y. (2022) 'Economic Impact of DIY Home Manufacturing of Consumer Products with Low-cost 3D Printing from Free and Open Source Designs', *European Journal of Social Impact and Circular Economy*, 3(2), pp. 1–24. Available at: <https://doi.org/10.13135/2704-9906/6508>.

Penas, O., Plateaux, R., Patalano, S. and Hammadi, M. (2017) 'Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems', *Computers in Industry*, 86, pp. 52–69. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.001>.

Penazzi, L. (2022) *Construction d'une fonction de transfert par la méthode Monte Carlo Symbolique : application à la thermique couplée en géométries complexes*.

Penazzi, L., Farges, O., Jannot, Y., Meulemans, J. and Schick, V. (2023) 'Resolution of Conductive-Radiative Heat Transfer in a Semi-Transparent Medium: Functional Estimation of the Radiative Source Term With Monte Carlo Method', *International Heat Transfer Conference* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1615/ihct17.50-130>.

Peng, F., Vogt, B.D. and Cakmak, M. (2018) 'Complex flow and temperature history during melt extrusion in material extrusion additive manufacturing', *Additive Manufacturing*, 22(August 2017), pp. 197–206. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.015>.

Pollard, D., Ward, C., Herrmann, G. and Etches, J. (2017) 'Filament Temperature Dynamics in Fused Deposition Modelling and Outlook for Control', *Procedia Manufacturing*, 11(June), pp. 536–544. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.147>.

Prajapati, H., Ravoori, D. and Jain, A. (2018) 'Measurement and modeling of filament temperature distribution in the standoff gap between nozzle and bed in polymer-based additive manufacturing', *Additive Manufacturing*, 24(July), pp. 224–231. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.030>.

Prajapati, H., Ravoori, D., Woods, R.L. and Jain, A. (2018) 'Measurement of anisotropic thermal conductivity and inter-layer thermal contact resistance in polymer fused deposition modeling (FDM)',

Additive Manufacturing, 21(February), pp. 84–90. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.019>.

Pronost, G., Mayer, F., Camargo, M. and Dupont, L. (2023) 'Digital Twins along the product lifecycle : A systematic literature review of applications in manufacturing [version 1 ; peer review : awaiting peer review]', (May), pp. 1–17.

Pronost, G., Mayer, F., Marche, B., Camargo, M. and Dupont, L. (2021) 'Towards a framework for the classification of digital twins and their applications', *2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2021 - Proceedings* [Preprint], (June). Available at: <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC52061.2021.9570114>.

Prusinowski, A. and Kaczyński, R. (2017) 'Simulation of processes occurring in the extrusion head used in additive manufacturing technology', *Acta Mechanica et Automatica*, 11(4), pp. 317–321. Available at: <https://doi.org/10.1515/ama-2017-0049>.

Pruvot, F., Dupont, L. and Morel, L. (2022) 'Collaborative Networks between Innovation Spaces', *2022 IEEE 28th International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2022 and 31st International Association for Management of Technology, IAMOT 2022 Joint Conference - Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC-IAMOT55089.2022.10033181>.

Putnik, G.D., Putnik, Z., Shah, V., Varela, L., Ferreira, L., Castro, H., Catia, A. and Pinheiro, P. (2021) 'Collaborative Engineering definition: Distinguishing it from Concurrent Engineering through the complexity and semiotics lenses', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1174(1), p. 012027. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1174/1/012027>.

Qi, Q. and Tao, F. (2018) 'Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison', *IEEE Access*, 6(January), pp. 3585–3593. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>.

Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L. and Nee, A.Y.C. (2019) 'Enabling technologies and tools for digital twin', *Journal of Manufacturing Systems*, (October), pp. 0–1. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>.

Rasheed, A., San, O. and Kvamsdal, T. (2020) 'Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective', *IEEE Access*, 8, pp. 21980–22012. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>.

Reim, W., Andersson, E. and Eckerwall, K. (2023) 'Enabling collaboration on digital platforms: a study of digital twins', *International Journal of Production Research*, 61(12), pp. 3926–3942. Available at: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2116499>.

De Rosa, S., Tammara, D. and D'Avino, G. (2023) 'Experimental and Numerical Investigation of the Die Swell in 3D Printing Processes', *Micromachines*, 14(2). Available at: <https://doi.org/10.3390/mi14020329>.

Sarpong, D., Ofosu, G., Botchie, D. and Clear, F. (2020) 'Do-it-yourself (DiY) science: The proliferation, relevance and concerns', *Technological Forecasting and Social Change*, 158(May). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120127>.

Segovia, M. and Garcia-Alfaro, J. (2022) 'Design, Modeling and Implementation of Digital Twins', *Sensors*, 22(14). Available at: <https://doi.org/10.3390/s22145396>.

Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. and Dassisti, M. (2021) 'Digital twin paradigm: A systematic literature review', *Computers in Industry*, 130. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>.

Seppala, J.E. and Migler, K.D. (2016) 'Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing', *Additive Manufacturing*, 12, pp. 71–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.007>.

Serdeczny, M.P., Comminal, R., Mollah, M.T., Pedersen, D.B. and Spangenberg, J. (2020) 'Numerical modeling of the polymer flow through the hot-end in filament-based material extrusion additive manufacturing', *Additive Manufacturing*, 36(July). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101454>.

Serdeczny, M.P., Comminal, R., Pedersen, D.B. and Spangenberg, J. (2018) 'Experimental validation of a numerical model for the strand shape in material extrusion additive manufacturing', *Additive Manufacturing*, 24(September), pp. 145–153. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.022>.

Sharafi, S., Santare, M.H., Gerdes, J. and Advani, S.G. (2021) 'A review of factors that influence the fracture toughness of extrusion-based additively manufactured polymer and polymer composites', *Additive Manufacturing*, 38(November 2020), p. 101830. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101830>.

Sigl, M.E., Bachmann, A., Mair, T. and Zaeh, M.F. (2020) 'Torque-based temperature control in friction stir welding by using a digital twin', *Metals*, 10(7), pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.3390/met10070914>.

Singh, V. and Willcoxy, K.E. (2018) 'Engineering design with digital thread', *AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2018*, pp. 1–21. Available at: <https://doi.org/10.2514/6.2018-0569>.

Singhal, I., Tyagi, B., Chaudhary, R., Sahai, A., Fayazfar, H. and Sharma, R.S. (2023) 'Toward an Improved Understanding for Design of Material Extrusion Additive Manufacturing Process-Based 3D Printers—a Computational Study', *Advanced Theory and Simulations*, 6(1), pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.1002/adts.202200704>.

Srinivasan, R., Giannikas, V., McFarlane, D. and Thorne, A. (2018) 'Customising with 3D printing: The role of intelligent control', *Computers in Industry*, 103, pp. 38–46. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.09.003>.

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. and Sui, F. (2018) 'Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), pp. 3563–3576. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.

Tao, F., Qi, Q., Liu, A. and Kusiak, A. (2018) 'Data-driven smart manufacturing', *Journal of Manufacturing Systems*, 48(July), pp. 157–169. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.

Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S.C.Y. and Nee, A.Y.C. (2019) 'Digital twin-driven product design framework', *International Journal of Production Research*, 57(12), pp. 3935–3953. Available at: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>.

Tichý, T., Šefl, O., Veselý, P., Dušek, K. and Bušek, D. (2021) 'Mathematical modelling of temperature

distribution in selected parts of fff printer during 3d printing process', *Polymers*, 13(23), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym13234213>.

Tlegenov, Y., Lu, W.F. and Hong, G.S. (2019) 'A dynamic model for current-based nozzle condition monitoring in fused deposition modelling', *Progress in Additive Manufacturing*, 4(3), pp. 211–223. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00089-3>.

Tregan, J.M., Amestoy, J.L., Bati, M., Bezian, J.J., Blanco, S., Brunel, L., Caliot, C., Charon, J., Cornet, J.F., Coustet, C., D'Alençon, L., Dauchet, J., Dutour, S., Eibner, S., El Hafi, M., Eymet, V., Farges, O., Forest, V., Fournier, R., Galtier, M., Gattepaille, V., Gautrais, J., He, Z., Hourdin, F., Ibarrart, L., Joly, J.L., Lapeyre, P., Lavieille, P., Lecureux, M.H., Lluc, J., Miscevic, M., Mourtaday, N., Nyffenegger-Péré, Y., Pelissier, L., Penazzi, L., Piaud, B., Rodrigues-Viguié, C., Roques, G., Roger, M., Saez, T., Terrée, G., Villefranche, N., Vourc'H, T. and Yaacoub, D. (2023) *Coupling radiative, conductive and convective heat-transfers in a single Monte Carlo algorithm: A general theoretical framework for linear situations*, *PLoS ONE*. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283681>.

Türk, D.A., Brenni, F., Zogg, M. and Meboldt, M. (2017) 'Mechanical characterization of 3D printed polymers for fiber reinforced polymers processing', *Materials and Design*, 118, pp. 256–265. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.050>.

Turner, B.N., Strong, R. and Gold, S.A. (2014) 'A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling', *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), pp. 192–204. Available at: <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>.

Valckenaers, P. (2020) 'Perspective on holonic manufacturing systems: PROSA becomes ARTI', *Computers in Industry*, 120, p. 103226. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103226>.

Valckenaers, P., Germain, B. Saint, Verstraete, P., Van Belle, J., Hadeli and Van Brussel, H. (2009) 'Intelligent products: Agere versus Essere', *Computers in Industry*, 60(3), pp. 217–228. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2008.12.008>.

Vanaei, H.R., Raissi, K., Deligant, M., Shirinbayan, M., Fitoussi, J., Khelladi, S. and Tcharkhtchi, A. (2020) 'Toward the understanding of temperature effect on bonding strength, dimensions and geometry of 3D-printed parts', *Journal of Materials Science*, 55(29), pp. 14677–14689. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05057-9>.

Varela, L., Putnik, G. and Romero, F. (2022) 'The concept of collaborative engineering: a systematic literature review', *Production and Manufacturing Research*, 10(1), pp. 784–839. Available at: <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2133856>.

Verstraete, P., Saint Germain, B., Hadeli, K., Valckenaers, P. and Van Brussel, H. (2006) 'On applying the PROSA reference architecture in multi-agent manufacturing control applications', *Proceedings of the Multi-agent Systems and Software Architecture Special Track at Net. ObjectDays*, pp. 31–47.

Visich, J.K., Li, S., Khumawala, B.M. and Reyes, P.M. (2009) 'Empirical evidence of RFID impacts on supply chain performance', *International Journal of Operations and Production Management*, 29(12), pp. 1290–1315. Available at: <https://doi.org/10.1108/01443570911006009>.

de Vries, S., Schuller, T., Galindo-Rosales, F.J. and Fanzio, P. (2024) 'Pressure drop non-linearities in material extrusion additive manufacturing: A novel approach for pressure monitoring and numerical modeling', *Additive Manufacturing*, 80(December 2023), p. 103966. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.103966>.

- Van Waeleghem, T., Marchesini, F.H., Cardon, L. and D'hooge, D.R. (2022) 'Melt exit flow modelling and experimental validation for fused filament fabrication: From Newtonian to non-Newtonian effects', *Journal of Manufacturing Processes*, 77(February), pp. 138–150. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.002>.
- Wong, C.Y., McFarlane, D., Zaharudin, A.A. and Agarwal, V. (2002) 'The intelligent product driven supply chain', *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 4(November 2002), pp. 393–398. Available at: <https://doi.org/10.1109/icsmc.2002.1173319>.
- Wu, D., Rosen, D.W., Wang, L. and Schaefer, D. (2015) 'Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation', *CAD Computer Aided Design*, 59, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.07.006>.
- Wu, Y., Zhou, L., Zheng, P., Sun, Y. and Zhang, K. (2022) 'A digital twin-based multidisciplinary collaborative design approach for complex engineering product development', *Advanced Engineering Informatics*, 52(January), p. 101635. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101635>.
- Wuest, T., Schmidt, T., Wei, W. and Romero, D. (2017) 'Towards (Pro-) Active Intelligent Products'.
- Yang, W., Zheng, Y. and Li, S. (2022) 'Digital twin of spacecraft assembly cell and case study', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35(3), pp. 263–281. Available at: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1992657>.
- Yosofi, M., Kerbrat, O. and Mognol, P. (2018) 'Energy and material flow modelling of additive manufacturing processes', *Virtual and Physical Prototyping*, 13(2), pp. 83–96. Available at: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1418900>.
- Zhang, J., Vasiliauskaite, E., De Kuyper, A., De Schryver, C., Vogeler, F., Desplentere, F. and Ferraris, E. (2022) 'Temperature Analyses in Fused Filament Fabrication: From Filament Entering the Hot-End to the Printed Parts', *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(2), pp. 132–142. Available at: <https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0339>.
- Zhong, R.Y., Dai, Q.Y., Qu, T., Hu, G.J. and Huang, G.Q. (2013) 'RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(2), pp. 283–292. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.08.001>.
- Zhong, R.Y., Xu, X., Klotz, E. and Newman, S.T. (2017) 'Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review', *Engineering*, 3(5), pp. 616–630. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.05.015>.
- Zhou, G., Zhang, C., Li, Z., Ding, K. and Wang, C. (2020) 'Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing', *International Journal of Production Research*, 58(4), pp. 1034–1051. Available at: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1607978>.
- Zhou, J., Li, P., Zhou, Y., Wang, B., Zang, J. and Meng, L. (2018) 'Toward New-Generation Intelligent Manufacturing', *Engineering*, 4(1), pp. 11–20. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.01.002>.
- Zhou, R., Jiang, J., Du, C., Lu, S. and Scholar, G. (2024) 'High-Speed 3D Printing Temperature Control with Optimized PID Parameters Based on Improved ALO Algorithm'. Available at: <https://doi.org/10.20944/preprints202401.1664.v1>.
- Zhu, Z., Anwer, N., Huang, Q. and Mathieu, L. (2018) 'Machine learning in tolerancing for additive manufacturing', *CIRP Annals*, 67(1), pp. 157–160. Available at:

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.119>.

Tous les programmes utilisés pour la réalisation de cette thèse seront regroupés dans une archive jointe au document de thèse. Ces annexes détaillent une partie des programmes utilisés pour faciliter la compréhension des lecteurs.

ANNEXE 1 : ACQUISITION DE MESURES

Cette annexe présente le code utilisé pour l'acquisition et le traitement de données depuis la caméra ou l'imprimante 3D.

Modèle pour l'acquisition de données - SDK

Nous souhaitons réaliser l'acquisition de données issues de la caméra thermique afin de pouvoir stocker, traiter et analyser ces données. Pour cela, nous allons devoir utiliser un kit de développement logiciel (ou SDK – *Software Development Kit* en anglais). La société Optris qui commercialise la caméra thermique que nous utilisons dans ces travaux de thèse propose un kit de développement logiciel adapté pour Matlab¹³, à partir duquel nous allons construire nos codes pour le stockage, le traitement, l'analyse et l'affichage des données.

Ce kit de développement est composé de plusieurs fichiers Matlab dont deux fichiers en particulier, dont nous allons nous servir comme base pour la construction de nos programmes pour l'acquisition de mesure, et en Annexe 4 pour le contrôle de l'imprimante.

Le premier fichier, intitulé « EvoIRMatlabInterface.m » définit un objet qui constitue l'interface entre Matlab et la caméra thermique.

Il est ensuite possible d'envoyer des requêtes à cet objet pour notamment récupérer de la caméra une matrice de taille 382 par 288 correspondant à la température mesurée pour chaque pixel de la caméra.

Un programme fourni dans le SDK, intitulé « evo_ir_matlab_example.m » présenté ci-dessous montre l'utilisation de cet objet. Nous allons utiliser ce fichier comme base pour la mise en place de notre acquisition de mesures.

¹³ <https://www.optris.com/fr/produits/cameras-infrarouges/software-development-kits-sdk/>

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Copyright (c) 2012-2017 All Rights Reserved,
% http://www.evocortex.com
% Evocortex GmbH
% Emilienstr. 1
% 90489 Nuremberg
% Germany
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Author: Christian Pfitzner, Evocortex GmbH
% Date: 2017-06-05
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Support: direct-sdk@optris.com
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Description:
% This file is the minimal example to access the
% EvoIRMatlabInterface. The output of the palette image
% is enhanced with some control possibilities, e.g.
% switching the palette's color, range and to trigger
% the shutter flag. % This example is tested with
% Windows and Linux.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;

% initialize the interface as a global variable
global IRInterface;
IRInterface = EvoIRMatlabInterface;

% initialize the viewer
IRViewer = EvoIRViewer;
global viewer_is_running;

% check for connection error
if ~IRInterface.connect()
    return
end

% set temp range (uncomment next line for usage)
%IRInterface.set_temperature_range(-20, 100);

% main loop
while(viewer_is_running)
    % grab image data
    RGB = IRInterface.get_palette();          % grab palette image
    THM = IRInterface.get_thermal();          % grab thermal image

    % process data here...

    % draw RGB image
    imagesc(RGB);
    drawnow();
end

IRInterface.terminate();                    % disconnect from camera
close all;

```

Pour la suite de nos codes, nous n'allons pas utiliser le viewer mais uniquement traiter l'image thermique obtenue, la partie contenant le viewer n'apparaîtra plus de manière active dans notre code.

Acquisition de données de la caméra et de l'imprimante

capture IR.m

1 of 2

```
%%
clear all;

% Initialisation de l'interface avec la caméra
global IRInterface;
IRInterface = EvoIRMatlabInterface;

%Verification de la connexion
if ~IRInterface.connect()
    return
end

%Definition de la plage de mesure de la caméra
IRInterface.set_temperature_range(0, 250);

%Connexion au port série de l'imprimante pour l'envoi de commandes
s = serialport("COM7",115200);
s;

%Attente pour l'initialisation
pause(2)

%Definition de la table d'acquisition
sz = [1000 8];
varTypes = ["double","double","double","double","double","double","double","double"];
varNames = ["Temperature","id","x","y","vent","control","Commande","Time"];
table_thm = table('Size',sz,'VariableTypes',varTypes,'VariableNames',varNames);
Temps_extrd = 20;

%Definition des valeurs initiales
Val_temp = 176; %commande filament
Val_vent_base = 127; %ventilateur
Val_hauteur = 50; %hauteur pièce
Val_tcontr_base = 210; %température buse

%Initialisation des valeurs pour la table d'acquisition
T_comm = Val_tcontr_base;
Vent = Val_vent_base;
Val_vent = Vent;
Val_tcontr = T_comm;
D_fil=0;

%Définition commandes Gcode
Ventchar = 'M106 S'; %ventilateur
Tchar = 'M104 S'; %température buse

pause(10)
compt=1;
Tstart = tic;
Tfin=0;

% main loop
% while(viewer_is_running)
while(compt>0)
% z=0;
```

Comme dans le code original, l'initialisation de l'interface est réalisée, ainsi que la connexion au port série, pour pouvoir envoyer des commandes et lire les réponses de l'imprimante.

Une table d'acquisition, qui va permettre d'enregistrer respectivement la température du filament, la position du filament (id, x, y), la vitesse de commande du ventilateur, la température de commande de la buse, la température réelle de la buse, et le temps depuis le lancement de la boucle de mesure.

A chaque itération de la boucle, une ligne de cette table est remplie.

```
% while(z<(Val_hauteur+0.5))

    % grab image data
    RGB = IRInterface.get_palette();          % grab palette image
    THM = IRInterface.get_thermal();          % grab thermal image

    %Récupération de la température du filament
    taille_zone=[2,250];
    table_mesures = zeros(taille_zone(1),taille_zone(2));
    for a = 1:taille_zone(1)
        for b = 1:taille_zone(2)
            % table_mesures(a,b)=THM(138-(floor(taille_zone(1)/2))+a,170-(floor
(taille_zone(2)/2))+b);
            table_mesures(a,b)=THM(142-(floor(taille_zone(1)/2))+a,170-(floor
(taille_zone(2)/2))+b);
        end
    end
    [M1,x1]=max(table_mesures);
    [M2,y]=max(M1);
    M3=(M2-1000)/10;
    x=x1(y);

    table_proche_extrd = [table_mesures(x,y-2),table_mesures(x,y-1),table_mesures(x,
y+1),table_mesures(x,y+2)];
    [max_vals,id]=max(table_proche_extrd);

    max_vals_conv = (max_vals-1000)/10

    Tfin = toc(Tstart);

    %récupération de la température de la buse
    writeline(s,'M105');
    data = readline(s);
    % str = convertCharsToStrings(data);
    str = erase(data,"ok");
    str = erase(str,"T:");
    str = split(str);
    T_comm = double(str(2));

    table_thm(compt,:) = {max_vals_conv,id,x,y,Val_vent_base,Val_tcontr_base,T_comm,
Tfin};

    compt = compt +1;
end

IRInterface.terminate();          % deconnection de la caméra

close all;
```

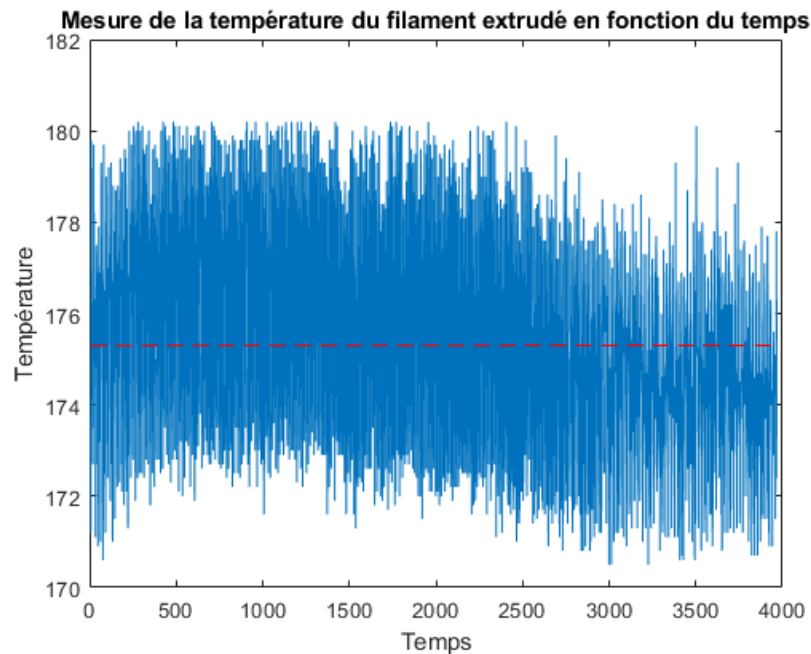
Au sein de la boucle, la température du filament est récupérée, puis une commande en Gcode est envoyée à l'imprimante ('M105', qui permet de connaître la température d'une buse de l'imprimante) afin de connaître la température réelle de la buse.

Une fois la pièce imprimée, le programme est coupé manuellement ou par une consigne dans la boucle while(), puis la table est sauvegardée pour une analyse des données.

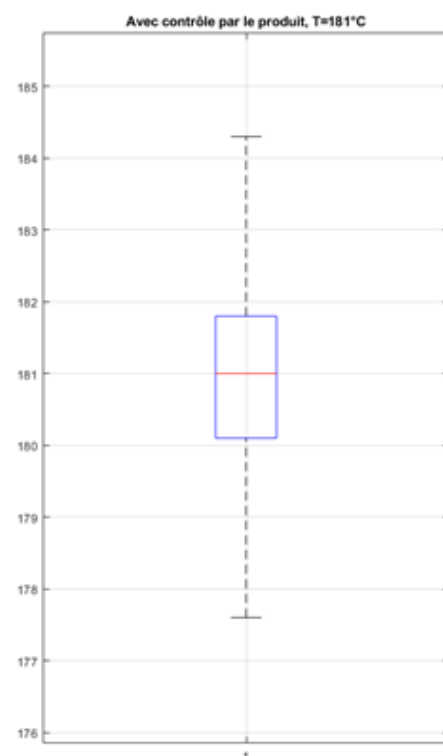
Analyse des données

Un programme, intitulé « table2graphTHM.m » permet de débarrasser la table de mesures des 1% de mesures du filament les plus basses, ce qui permet d'avoir au final une table de mesure contenant uniquement les valeurs de température à la sortie de la buse pendant l'extrusion du filament, et pas celles pendant le déplacement de la buse entre 2 couches.

On obtient à la suite de ce traitement une figure de cette forme (ici pour une pièce non contrôlée).



On peut également afficher ces résultats sous la forme d'une boîte à moustache, comme c'est le cas de la figure ci-contre par exemple. Cela permet de pouvoir comparer la dispersion de la température du filament extrudé entre une pièce imprimée avec et sans contrôle, et de vérifier si la pièce contrôlée a bien une médiane de température proche de la température de consigne.



ANNEXE 2 : IDENTIFICATION DES MODELES EXPERIMENTAUX

Pour déterminer un modèle expérimental, nous avons réalisé l'acquisition d'un ensemble de données. A partir de ces données, nous avons utilisé la toolbox "System Identification" de MATLAB pour estimer des modèles dynamiques de notre système.

La toolbox "System Identification" de MATLAB est un outil puissant utilisé pour construire des modèles mathématiques de systèmes dynamiques à partir de données mesurées.

Pour utiliser cette toolbox, il faut au préalable traiter notre jeu de données pour le convertir en un objet « iddata » (pour *input-output data*). Ces objets servent à encapsuler les données de mesure d'entrée et de sortie du système que l'on souhaite identifier. Les fonctions d'identification de système utilisent ces mesures pour estimer un modèle. Les fonctions de validation de modèle utilisent les mesures d'entrée pour fournir l'entrée des simulations, et les mesures de sortie pour comparer dans quelle mesure la réponse du modèle estimé correspond aux données originales.

Nous allons donc séparer nos données recueillies en deux objets, un pour l'estimation du modèle et un pour la validation de ce modèle. Cette opération est réalisée à l'aide d'un script Matlab, intitulé « preparation_donnees.m ».

```

%clear all;
%loadedData = load('C:\Users\pronost1\Nextcloud\THESE GUILLAUME
PRONOST\Expérimentation\Thermal image analysis\SDK\table_thm50x50_4_1_1202.mat');
%table_dyn = loadedData.table_thm;
dimensions = size(table_dyn);

% Préallouer un tableau de cellules pour stocker les colonnes converties
columns = cell(1, 5);

% Convertir chaque colonne en vecteur double
for colIndex = 1:5
    columns(colIndex) = table2array(table_dyn(:, colIndex));
end

% Afficher les dimensions pour vérifier (optionnel)
% for colIndex = 1:5
%     disp(['Column ', num2str(colIndex), ' size: ', num2str(size(columns
{colIndex}))]);
% end

sortie = columns{4};
vent = columns{5};
temp_reel = columns{2};
temp_ctrl = columns{1};
time = columns{3};

% Filtrer la mesure de la température du filament
medianN = 20;
coeffsmooth = ones(1, medianN)/medianN;
fDelay = (length(coeffsmooth)-1)/2;

sortie_smooth_0 = filter(coeffsmooth, 1, sortie);
sortie_smooth=sortie;

for j=1:(dimensions(1)-floor(fDelay))
    sortie_smooth(j)=sortie_smooth_0(j+floor(fDelay));
end

sim_sortie = cat(2,time,sortie_smooth);
sim_temp_ctrl = cat(2,time,temp_ctrl);
sim_temp_reel = cat(2,time,temp_reel);
sim_vent = cat(2,time,vent);

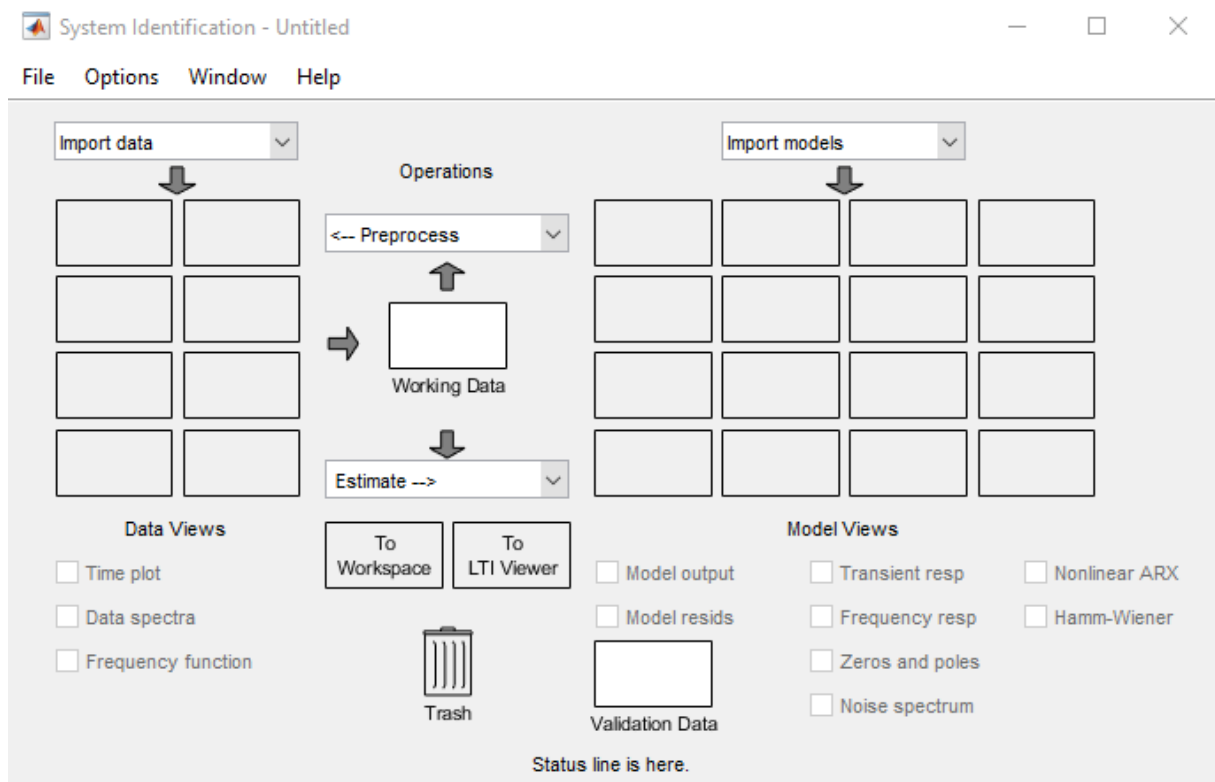
% Construction des objets iddata
z = iddata(temp_reel,temp_ctrl,(time(dimensions(1))-time(1))/dimensions(1));

% First 7000 samples used for estimation
ze = z(10:7000);
% Remaining samples used for validation
zv = z(7001:dimensions(1));

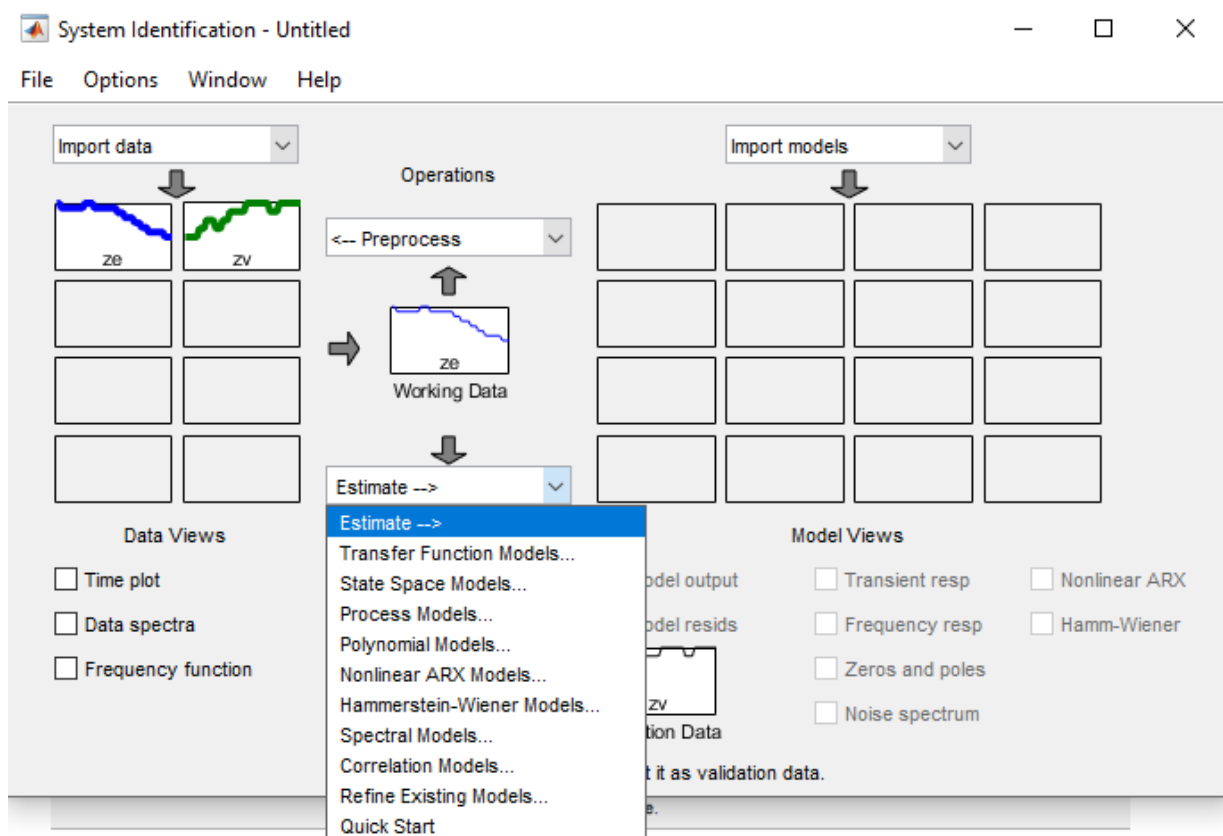
```

Une fois ces objets créés, on peut alors utiliser la toolbox « System Identification » pour estimer un modèle. Ici l'exemple donné sera le modèle prenant en entrée la température de commande de la buse, et en sortie la température réelle de la buse.

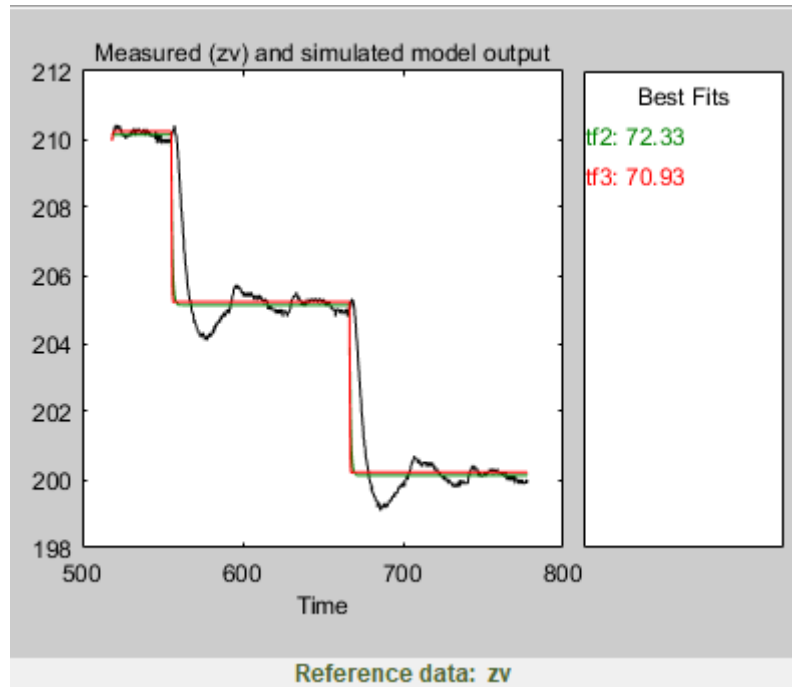
Une fois lancé, la toolbox ouvre cette fenêtre :



Une fois les deux jeux de données (estimation et validation) importés, on peut alors estimer plusieurs types de modèles :



Dans notre cas, nous avons testé plusieurs types de modèles de fonctions de transfert du premier et second ordre notamment, et avons pu voir qu'un modèle du premier ordre estimait de manière correcte le comportement du système étudié.



Le modèle avec le meilleur fit était finalement un modèle du 1^{er} ordre, qui nous donne finalement une estimation du comportement de la buse de la forme : $G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$ avec $K = \tau = 1,33$.

Nous avons également testé l'utilisation de modèles non linéaire (ARX) mais ne présentant pas un meilleur fit et complexifiant notre modélisation, nous avons décidé de rester sur une modélisation plus simple telle que présentée ci-dessus.

ANNEXE 3 : OPTIMISATION DE LA COMMANDE DU SYSTEME

L'objectif de la fonction d'optimisation développée dans cette thèse est de permettre d'obtenir une commande adéquate de l'imprimante en fonction d'une différence entre la température du filament extrudé et sa commande. Pour cela, on va utiliser dans Matlab la fonction « fmincon » qui permet de trouver le minimum d'un ensemble de valeurs pour réaliser un objectif, tout en satisfaisant un ensemble de contraintes. Pour cela on définit une fonction objectif (appelée « objectif_3D.m ») et une fonction contrainte (appelée « contrainte_3D.m ») :

```
objective_3D.m 1 of 1

function f=objective_3D(opti)
f=-abs(opti(1)); %minimiser le delta de température
f=-f;
end

constraints_3D.m 1 of 1

function [g geq]=constraints_3D(opti)
g(1)=0.8211*(opti(1))-0.0104*(opti(2))-(opti(3)+0.001);
g(2)=-0.8211*(opti(1))+0.0104*(opti(2))+(opti(3)-0.001);
geq=0;
end
```

Une fois ces fonctions définies, on peut chercher à minimiser les consignes de variation de vitesse du ventilateur et de température de la buse :

```
optim_3D.m 1 of 2

%% On définit les valeurs nécessaires pour pouvoir démarrer notre fonction d'optimisation ✓

% T_comm = 210;
Vent = 127; %On a besoin de la valeur du ventilateur pour fixer les bornes
           % de variations du delta de vitesse du ventilateur, car
           % celle-ci varie entre 0 et 255

% T_fil = 170;
D_fil = 5; %On identifie le delta de température du filament, notre entrée

%% On fixe les valeurs limites (lower bound et upper bound)

x0 = [1 1 D_fil];
lb = [-10 -Vent D_fil];
ub = [10 255-Vent D_fil];

% x0 = [1 1 D_fil Vent];
% lb = [-10 -Vent D_fil Vent];
% ub = [10 255-Vent D_fil Vent];
options = optimset('Display','iter','MaxFunEvals',300,'MaxIter',100,...
'TolFun',1e-8,'TolX',1e-8);

%% On cherche les valeurs qui vont minimiser la fonction objectif en respectant les ✓
contraintes
opti=fmincon('objective_3D',x0,[],[],[],[],lb,ub,'constraints_3D',options);

%cette fonction retourne l'objet "opti" qui contient la correction de
%température, la correction de ventilation, et le delta de température du
%filament
```


ANNEXE 4 : CONTROLE DE L'IMPRIMANTE PAR LE PRODUIT

Pour contrôler l'imprimante, nous allons nous resservir du code « capture_IR.m » présenté en Annexe 1 en y ajoutant notre fonction d'optimisation ainsi qu'une série de commandes à envoyer à l'imprimante sous forme de Gcode. La première partie du code (initialisation) ne change pas jusqu'à la boucle while(). La suite du code, à partir de cette boucle, est présentée ci-dessous :

DT_opti_IR.m

2 of 3

```
% while(viewer_is_running)
while(compt>0)
% z=0;
% while(z<(Val_hauteur+0.5))

    % grab image data
    RGB = IRInterface.get_palette(); % grab palette image
    THM = IRInterface.get_thermal(); % grab thermal image

    %Récupération de la température du filament
    taille_zone=[2,250];
    table_mesures = zeros(taille_zone(1),taille_zone(2));
    for a = 1:taille_zone(1)
        for b = 1:taille_zone(2)
            % table_mesures(a,b)=THM(138-(floor(taille_zone(1)/2))+a,170-(floor(
            (taille_zone(2)/2))+b));
            table_mesures(a,b)=THM(142-(floor(taille_zone(1)/2))+a,170-(floor(
            (taille_zone(2)/2))+b));
        end
    end
    [M1,x1]=max(table_mesures);
    [M2,y]=max(M1);
    M3=(M2-1000)/10;
    x=x1(y);

    table_proche_extrd = [table_mesures(x,y-2),table_mesures(x,y-1),table_mesures(x,
y+1),table_mesures(x,y+2)];
    [max_vals,id]=max(table_proche_extrd);

    max_vals_conv = (max_vals-1000)/10

    Tfin = toc(Tstart);

    % Commandes DT V3
    D_fil = -(max_vals_conv - Val_temp);
    Vent = Val_vent;

    writeline(s,'M105'); %receive temp hotend
    data = readline(s);
    % str = convertCharsToStrings(data);
    str = erase(data,"ok");
    str = erase(str,"T:");
    str = split(str);
    T_comm = double(str(2));

    % Optimisation de la réponse
    x0 = [1 1 D_fil];
    lb = [-10 -Vent D_fil];
    ub = [10 255-Vent D_fil];
    options = optimset('Display','iter','MaxFunEvals',300,'MaxIter',100,...
        'TolFun',1e-8,'TolX',1e-8);
    opti=fmincon('objective_3D',x0,[],[],[],[],lb,ub,'constraints_3D',options);

    Val_tcontr = opti(1) + T_comm;
    Val_vent = opti(2) + Val_vent;
```

```
if Val_vent > 255
    Val_vent = 255;
end
if Val_vent < 0
    Val_vent = 0;
end

% Gcode envoyé
vent=num2str(Val_vent);
tcontr=num2str(Val_tcontr);
Gvent = append(Ventchar,vent);
Gtcontr = append(Tchar,tcontr);
writeline(s,Gvent); %envoi de commande de ventilation
ok=readline(s);
writeline(s,Gtcontr); %envoi de commande de température de la buse
ok=readline(s);

table_thm(compt,:) = {max_vals_conv,id,x,y,Val_vent,Val_tcontr,T_comm,Tfin};
compt = compt +1;
end

IRInterface.terminate(); % deconnection de la caméra

close all;
```



SYSTEMATIC REVIEW

REVISED Digital Twins along the product lifecycle: A systematic literature review of applications in manufacturing [version 2; peer review: 2 approved, 2 approved with reservations]

Guillaume Pronost , Frédérique Mayer, Mauricio Camargo, Laurent Dupont 

Université de Lorraine, ERPI, F-54000 Nancy, France

v2 First published: 21 Mar 2023, 3:3
<https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17807.1>
Latest published: 08 Mar 2024, 3:3
<https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17807.2>

Abstract

Background

The evolution of product expectations in the era of mass personalization implies an improvement and a better control of individualized creation and production processes throughout the product lifecycle. The application of the digital twin seems to be a favoured solution in this context, but its study during the lifecycle of a product has only been partially evoked in the literature.

Methods

The purpose of this research is to identify the leverages and barriers to support the digital twin diffusion in the manufacturing industry from a technological, operational, and social standpoint. To determine these elements, this paper will identify current digital twins applications in the literature under two main dimensions: the type of digital twin, and its applications along the product lifecycle. To achieve this analysis a systematic literature review was carried out. The publications selection was based on the presence in these of a case of application of a digital twin with a focus in the Manufacturing sector. Within this review, 188 scientific papers were comprehensively compiled and analyzed.

Results

Results showed that although the term digital twin is widely used, the deployment of digital twin technologies in manufacturing is still at an early stage as most of the reported digital twin applications were in

Open Peer Review

Approval Status 

	1	2	3	4
version 2				
(revision)				
08 Mar 2024				
version 1				
21 Mar 2023				

1. **Pai Zheng** , The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, Hong Kong
2. **Xingzhi Wang** , University of New South Wales, Sydney, Australia
3. **Shohin Aheleroff** , The University of Auckland, Auckland, New Zealand
4. **Tianliang Hu**, Shandong University, Jinan, China

Any reports and responses or comments on the article can be found at the end of the article.

fact prototypes focused on the real-time observability of the physical system, either for optimization or predictive maintenance. Moreover, regarding the product lifecycle, most of the applications have been focused on the production and operational phases whereas those at the design and disposal phases are still limited.

Conclusions

This paper presents an original approach to the study of digital twins, focusing simultaneously on the type of digital twin, the application area and the lifecycle phase. Under the basis of the obtained results, future perspectives on the use of digital twins along the lifecycle are proposed.

Keywords

Digital Twin, Digital Shadow, Product Lifecycle, Literature review, Manufacturing

Corresponding author: Guillaume Pronost (guillaume.pronost@univ-lorraine.fr)

Author roles: **Pronost G:** Conceptualization, Investigation, Methodology, Writing – Original Draft Preparation; **Mayer F:** Conceptualization, Investigation, Methodology, Writing – Review & Editing; **Camargo M:** Conceptualization, Investigation, Methodology, Writing – Review & Editing; **Dupont L:** Investigation, Writing – Review & Editing

Competing interests: No competing interests were disclosed.

Grant information: The work reported in this paper has been undertaken and funded as part of the H2020 INEDIT project (Project Grant Agreement N°869952).

The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Copyright: © 2024 Pronost G *et al.* This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

How to cite this article: Pronost G, Mayer F, Camargo M and Dupont L. **Digital Twins along the product lifecycle: A systematic literature review of applications in manufacturing [version 2; peer review: 2 approved, 2 approved with reservations]** Digital Twin 2024, 3:3 <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17807.2>

First published: 21 Mar 2023, 3:3 <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17807.1>

REVISED Amendments from Version 1

Thanks to the reviewers for their comments and suggestions. With their support, the paper has been comprehensively enhanced. Contributions had been highlighted and better explained in order to improve the paper readiness and comprehensiveness.

Compared with the previously published version, the new version has been revised according to the experts' review comments mainly in the following aspects:

1. Research questions are strengthened to be more aligned with the findings and contributions.
2. The discussion section is restructured and findings and contributions were clearly detailed.
3. Informations unrelated to the manufacturing sector are removed.
4. Precautions are made regarding to the terminology used in the paper.
5. The language of the paper is touched up.
6. Figures are improved overall to maintain consistency between them, and color choices were made to facilitate black and white reading.
7. The references used for the analysis, which were only present in the data repository, are now inserted in the paper body.

Any further responses from the reviewers can be found at the end of the article

Introduction

The development of digital tools has triggered an evolution of modern production means and methods in recent years. With the development of digital models, the different stakeholders (designers, manufacturers, users, ...) of the product creation process (design, manufacturing) can communicate around a common object, acquire and share information, and manage products more precisely during every phase of their lifecycles. This digitization is thus seen as an opportunity to achieve higher levels of productivity and effectiveness. At the heart of this Industry 4.0 is an emerging technology for the operation of technical systems: digital twins¹. The emergence of digital twins enriches the application of these models in several areas, and it is beneficial to enhance the traditional product design and development processes². Although the technical and conceptual basis leading to digital twins were established since several decades ago, the concept of digital twin was first introduced in 2002 by Dr Michael Grieves from the University of Michigan and it was called the "Conceptual Ideal for product lifecycle Management (PLM)" representing the linkage between real space and virtual space. A digital twin is a digital representation of a physical asset, linked with the physical counterpart by a flow of data enabling the real-time update of the digital model. digital twins play a role in monitoring, controlling, and predicting a product's behavior at all stages of its lifecycle from design through to end-of-life.

The general problem that motivates our work stems from the need to evolve the design-production chain to meet the growing demand for product individualization and personalization³, which characterizes the specific needs of each customer for

one or more products. The convergence between design and production for mass customization leads to a need for an observation and improvement of the complete product lifecycle. In this context, it is relevant to observe the application of digital twins and their nature throughout this life cycle.

However, the existing literature is mainly interested in the application of the digital twin to improve a single phase of this life cycle. Different authors tackle the use of digital twins for the design phase, such as Tao *et al.*⁴ or Lo *et al.*⁵, for the production phase, such as Cimino *et al.*⁶, or Errandonea *et al.*⁷ for the use phase of the product. These papers focus on a specific phase of the product's life in their analysis, which allows for an accurate visualization of the state-of-the-art and the use of digital twins during that phase, but makes their study isolated from any visualization of the role of the digital twin throughout the entire life cycle. This hermetic segmentation of the study of digital twins leads to the production of as many studies as there are domains or moments of application, which results in a multiplication of contradictory definitions of the nature of a digital twin.

To tackle this issue, this research carries out a systematic review of the literature on the applications of the digital twin throughout the whole product lifecycle, with a focus on the type of digital twin and the product life cycle for each application. This review will describe, using classifications from the literature and previous works, the nature and functions of digital twins, in the context of the Manufacturing sector. In this context, this work is inspired by the analysis carried out by Semeraro *et al.*⁸ observing the distribution of application areas, life cycle phases, and applications within each phase. Following on from the work of Liu *et al.*⁹ and Semeraro *et al.*⁸ which also analyzed the distribution of digital twin-related studies along the product lifecycle to determine the different possible applications in each phase of this cycle, this study will also focus on the nature of the digital twin, i.e. the interaction structure between digital and physical objects. The originality of this work relies on providing an overview of the research activity on industrial application of digital twins regarding simultaneously their typology, the life cycle stage in which they are applied, and their specific application. Although a framework of the type of applications in manufacturing along the product life cycle has been proposed by Liu *et al.*, it never has been applied to identify the prominence of each application in the manufacturing sector, nor to identify the degree of maturity of digital twins for these applications. The remainder of this paper is structured as follows. We begin by reviewing the current manufacturing application areas of digital twins in the literature along the product life cycle in the scientific literature, along with a classification of the different existing subcategories of digital twins. Subsequently, we describe the research questions and hypotheses followed by the used literature review protocol. Then, a detailed view of the most relevant results is presented followed by a discussion on the implications of the main findings to answer the research questions set in the previous section, with the objective to identify the leverages and barriers to support the DT diffusion in manufacturing

industry, and establish a research agenda to support the future development of the digital twins regarding the proposed categories of applications. Lastly, a conclusion establishes future perspectives on the use of digital twins along the lifecycle.

Existing theories and previous work

Definition of digital twins: from aerospace to engineering

The first formal definition of a digital twin can be attributed to Glaessgen et Stargel¹⁰, in which the authors define the roadmap of the use of digital twins in aeronautical and aerospace applications for the US Air Force and NASA.

The need to use a digital twin is justified by the authors because of several issues. Indeed, due to the evolution of technologies and the rapid complexification of systems and failures modes, it has become necessary to go beyond the current empirical and heuristic design rules. In addition, the design of a physical system would require a series of tests in extreme conditions, which would be impossible to reproduce on earth on a physical prototype, because of the cost of recreating such conditions, along with the cost of the destruction of the prototype in each experiment. Due to these practical and economical constraints, it is necessary to realize these series of experiments on a digital counterpart by emulation. Moreover, the vehicles produced are likely, during their phase of use, to encounter unpredictable conditions and situations. Because of that, it was necessary to develop revolutionary approaches for the verification and validation of the models, simulations, and systems used. Finally, the modern high-performance systems used in aeronautics and aerospace require real-time management of its complex materials, structures, and subsystems.

To meet these criteria, they define the nature and composition of a digital twin: “If various best-physics (i.e. the most accurate, physically realistic, and robust) models can be integrated with one another and with on-board sensor suites, they will form a basis for certification of vehicles by simulation and for real-time, continuous health management of those vehicles during their missions. They will form the foundation of a digital twin digital twin”¹⁰.

Thus, they introduce the widely used definition of a digital twin: “an integrated multi-physics, multiscale, probabilistic simulation of a complex product and which uses the best available physical models, sensor updates, etc... to mirror the life of its corresponding twin.” Although this definition is admitted in literature as a basis for many articles on the subject of digital twins, it presents inaccuracies, which results in multiple definitions of the digital twin throughout the literature, creating confusion as to the meaning of this term on this subject in literature.

As a more general definition, a digital twin can be defined as a virtual representation of an object or system, provided in real time by data coming from its physical counterpart, allowing

it to represent it accurately over time. It can be defined as a set of three parts:

1. A model of an object.
2. An evolving set of data relating to the object, also called a digital thread.
3. A means of dynamically updating or adjusting the model in accordance with the data.

Since its first formal definition in 2012 in the context of aeronautical vehicles, the digital twin has become a research topic whose interest grows exponentially in the literature, driven by the development of Industry 4.0, of which it is one of the branches. This growing interest has led to the democratization of the digital twin in many research domains such as medicine¹¹, smart cities¹², manufacturing^{12,13}, aerospace¹⁴ or construction¹⁵.

While analyzing use cases from other industries, this study will mainly focus on the manufacturing sector in particular, as it is the most represented sector in terms of the number of digital twin use cases available.

Digital twins along the product lifecycle

Considering the life of a product, we established, based on the literature^{5,8,9} that its lifecycle can be divided into four distinct successive phases:

1. System creation/Design phase.
2. Manufacturing/Production phase.
3. Operational/Use phase.
4. Disposal/End-of-life.

According to Lo *et al.*⁵, although studies presenting applications of digital twins exist in each phase of the product lifecycle, a majority (64%) of these studies focus on the production phase of the product lifecycle.

In order to further classify the uses of the digital twin during each of these phases, an exhaustive list of these applications is proposed for each phase. This list relies on the work of Liu *et al.*⁹, who proposed a classification of applications based in a systematic review of the industrial applications of digital twins along the product lifecycle, as presented in Table 1. The authors of this classification carried out a literature review to obtain a classification of the various applications in the context of the manufacturing industry. We will use this classification to observe the intensity of each application of the digital twin and the type of digital twin for each application.

Moreover, the digital twin can, depending on the application, be either the twin of the product being created or the twin of the production system creating a product, thus giving different information to the user. As this review focusses on

Table 1. Applications of digital twins along the different phases of the product lifecycle, from Liu *et al.*⁹.

Applications in the design phase	
Iterative optimization	The use of digital twins allows for iterative design optimization to improve accuracy and efficiency, product material selection, and reflect changing dynamic parameters. The digital twin is able to predict product or system performance and identify potential problems to indicate the direction of optimization, which traditional simulation may overlook.
Provide data integrity	The digital twin collects and analyzes data from the physical space to provide a sufficient basis for decision making in the design phase to each stakeholder, while ensuring that no proprietary information is disclosed.
Virtual evaluation and verification	The digital twin consists of a high-fidelity multi-physics digital model of the product and its environment in which it operates, which allows us to verify its behavior in real situations through simulation. The high fidelity of the model within the digital twin also makes it possible to observe unforeseen behaviors of the product, as close to reality as possible.
Applications in the manufacturing phase	
Real-time monitoring	The digital twin can be used as a tool for state monitoring of a product being produced, by comparing the received data with the expected model of the product and updating it.
Production control	The digital twin can link the physical system to its virtual counterpart for intelligent real-time control to perform preset operations and react to disturbances.
Workpiece performance prediction	The digital twin can predict the performance of a part before it is manufactured, linked to the degradation of machines and tools, or the choice of material, for example. To do this, it uses updated models of physical phenomena related to the manufacturing process, driven by an empirical database.
Human-robot collaboration and interaction	By working in a closed-loop manner, the digital twin of a human-robot collaborative work environment supports human-robot task allocation, workstation layout optimization, human ergonomic analysis, and robot program test.
Process evaluation and optimization	The quality of products depends on the conditions of the manufacturing process. To gain a better understanding of the working conditions of the machine, a digital twin collects and interprets data from the machine, the process planning, and the models. It then interacts with the manufacturing environment and helps the machine to improve the process performance.
Asset management	The digital twin contributes to the visibility and traceability of manufacturing assets, which plays a critical role in improving the shop-floor performance and contribute to better control, maintenance, and planning decisions.
Production planning	Due to the increasing disturbances in the manufacturing phase, the need for intelligent dynamic planning has become more prevalent. Through the use of a digital twin, it is possible to provide globally-optimized production planning based on real-time status changes.
Applications in the operational phase	
Predictive maintenance	The digital twin enables a real-time representation of a physical object. This monitoring allows for predictive maintenance. The interventions for repair and maintenance operations can be carried out before these problems become critical, which can represent a considerable saving in time and money.
Fault detection and diagnosis	Digital twin fault diagnosis combines both data-based fault diagnosis (which consists of identifying patterns in the data received from the physical system corresponding to a defect, a technical problem, or wear and tear of parts, by comparing it to saved data associated with a similar issue) along with physics-based fault diagnosis to model the behavior of a physical product, to predict both pre-known anomalies and unpredicted anomalies.
State monitoring	The digital twin can be used as a tool for state monitoring of system behavior, by comparing the received data with the expected model of the system and updating it. This allows the real system to be observed at any time without the need to measure the information to be acquired directly on the real system. This enables a better observability of the real system.
Performance prediction	By having access to the full lifecycle data of a product, along with its model, the digital twin can predict the system's performance and help to optimize it.
Virtual test	The digital twin can simulate the behavior of its physical counterpart with great accuracy, enabling virtual testing in a simulated environment.

the study of the product lifecycle, we consider the use of the digital twin in the context of the product. Thus, for example the use of a digital twin of a production system for real-time monitoring would fall under the manufacturing/production phase of the product lifecycle if the studied product is manufactured using this production system, but would fall under the operational/use phase of the product lifecycle if the studied product is the production system itself.

Classification of digital twins regarding their structural functions

The recent development of digital twins applications and application domains has led to a multiplication of definitions, resulting in difficulties of organization and understanding of the literature, some authors describing any digital model (CAD, etc...) as a digital twin¹, while other authors specify the need for the presence of an associated physical object¹⁰, or a data flow between these two objects¹⁶.

Thus, before carrying out a systematic review of the literature on digital twins, and in particular their use in design and production, a first exploratory review has been realized to identify the set of technical criteria on the main functions of the digital twin, to propose a systematic classification of

digital twins according to these criteria. The realization of this classification framework, based on various approaches to classifying digital twins in the literature, has been carried out in a previous study¹⁷, to serve as the basis for the literature review carried out in this paper.

The result of this work is a separation of the digital twin in four subcategories, presented in [Figure 1](#), based on three differentiation criteria:

1. Presence of a physical system: the digital model studied may or may not have a physical counterpart of which it serves as a representation.
2. Automatic model update: data collected on the physical system can automatically feed the digital model. Otherwise, the model will only be updated with information from the physical system manually, by user decision.
3. Control of the physical system: information from the execution of the digital model can be automatically fed into the physical system as a command from the physical system. Otherwise, there will be no automated communication from the digital model to its physical counterpart.

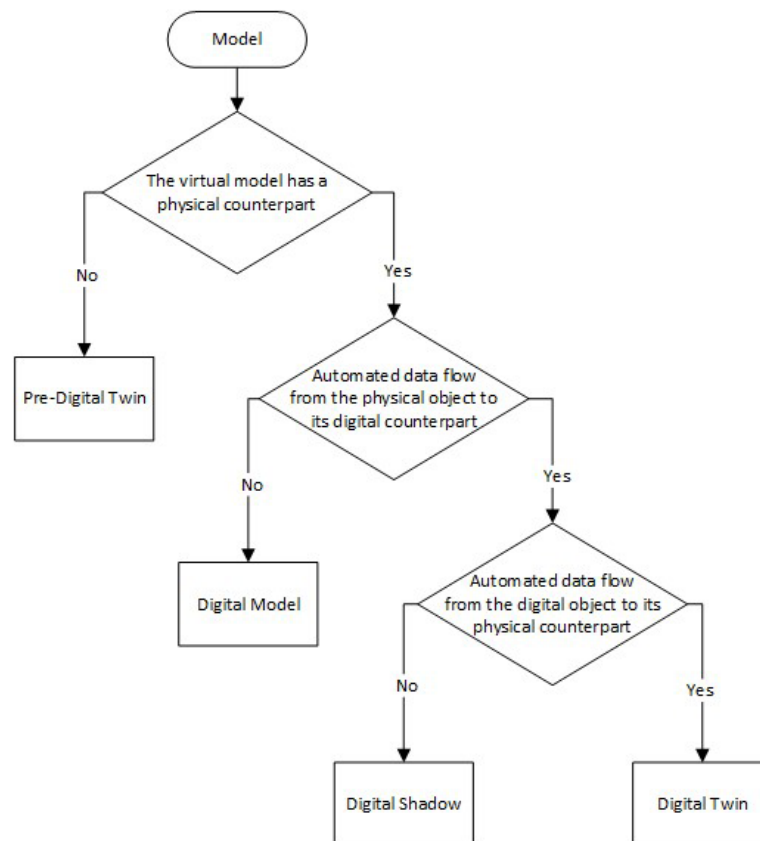


Figure 1. Decision tree of the digital twins subcategories, from 1.

Based on these classification criteria, a decision tree, presented in [Figure 1](#), has been created, to be able to determine, when reading a scientific document dealing with “Digital Twins”, the subcategory to which the digital twin mentioned belongs. The digital twins in this study are thus classified in 4 categories : Pre-Digital Twin (PDT), Digital Model (DM), Digital Shadow (DS) and Digital Twin (DT). These acronyms will be used in the rest of this study to describe each of these subcategories, while the term “digital twin” in all letters will be used to describe the whole thing.

Methods

Research positioning

To define the objectives and research questions (RQs) of this paper, an exploratory literature overview was conducted, whose results are presented in the previous section. One of the conclusions of this exploration, as can be seen in the previous section and from which stems the need for a classification of digital twins, the term digital twins can characterize very different virtual objects, as has also been presented by Madni *et al.*¹⁶ or Kritzinger *et al.*¹³. A first objective of this paper is therefore to study, with the help of the classification presented above, the presence of these different virtual objects grouped under the term “Digital Twin” in the literature, in a continuation of the work of Kritzinger *et al.*¹³.

Another point that could be highlighted is the diversity of application areas of digital twins within the literature. To identify all the domains of application of digital twins in the literature and their distribution, one of the objectives of this paper will be to identify the domain and the type of application.

In addition to a diversity of application domains, in the literature, as presented in the previous section, we find digital twins throughout each of the different phases of the lifecycle of a product, from its ideation and design phase to its use and end-of-life. Nevertheless, few studies deal in a general way with the review of the literature of the digital twins all along this lifecycle. An objective of this paper will therefore be to observe the product lifecycle phases where digital twin technology is applied in the papers from the selected literature. This will allow us to have a representation of the importance of each of these phases in the literature. This paper will focus its attention on studies which include use cases (i.e. the realization of an application of a digital twin technology) displaying the use of digital twin technology, in particular to observe the proportional occurrence of each of the subcategories of digital twins defined in the previous section in each of the phases of a product's lifecycle.

Given the above considerations and objectives, the following research questions (RQs) are formulated:

- **RQ1:** What are the current manufacturing application areas of digital twins in the literature regarding the type of digital twin and the product life cycle?
- **RQ2:** What are the leverages and barriers to support the digital twin diffusion in manufacturing industry from a technological, operational, and social standpoint?

Applied research methods

A review protocol, based on the work of Siddaway *et al.*¹⁸ and adapted from Cruz Sanchez *et al.*¹⁹, is applied to carry out the selection of studies for a systematic literature review about the use of digital twins along the product lifecycle.

The review protocol, presented in [Table 2](#), consists of five steps:

1. **Search strategy:** It defines the type of studies, keywords, search equations, and the database to be considered in the review.
2. **Study selection criteria:** It describes the inclusion and exclusion principles that are useful to subset the retrieved documents.
3. **Study selection procedure:** It describes how the selection criteria is performed. The steps and the features to analyze in order to accept or reject a particular study are defined.
4. **Data extraction strategy:** Defines the information that is extracted from the studies.
5. **Study quality assessment:** Evaluates the pertinence of a study regarding the research question. Quality checklists are used to guide the evaluation of the study.

Data was extracted manually from Web of science database based on the research equation presented [Table 2](#), and was manually analyzed to identify relevant information.

[Figure 2](#) illustrates the research methodology.

Findings

In this section, the results of the literature review carried out will be presented, before interpretations are made based on these results in the next section.

A total of 188 papers^{20–206} on the subject of digital twins, and which present a practical case study, were selected after multiple screenings. The results are presented in an external repository as appendix of this paper²⁰⁷.

Distribution of digital twins use cases along the Lifecycle

As presented in Section 2, the lifecycle of a product consists of four phases: Design, Production phase (Manufacturing phase), Operational phase, and Disposal. [Figure 4](#) presents the evolution of the publications reviewed belonging to these four phases during the period of analysis.

As presented in [Figure 3](#), a vast majority of the publications selected for this review were published after 2018. The fact that the emergence of case studies and applications of digital twins is very recent and plentiful enables us to explain the fact that many different definitions and methods co-exist in the scientific community. As depicted, the two main phases where digital twin applications are presented are the Production

Table 2. Systematic review protocol for the literature review.

Stage	Principle	Description
Search strategy	Type of Studies	Journal papers and conference proceedings
	Keywords	"Digital Twin", "manufacturing", "design", "PLM"
	Search equation	(TI=(Digital Twin)) AND ((TS=(lifecycle OR life cycle \\\ OR life-cycle OR monitor* OR predict* OR maintenance) \\\ AND TS=(manufactur* OR production OR design)) \\\ OR TI=(manufactur* OR production OR design)) <i>Field tags : TS=Topic; TI=Title</i>
	Period of time	2000 – 2021
	Databases	Web of Science
Study selection	Criteria	1) Articles related to the use of digital twin technology for the creation of a product
		2) Studies should focus on the realization of an application of the digital twin along the lifecycle of a product
	Procedure	1) Title, abstract, and keywords are screened
		2) Introduction section and conclusions were read
		3) Full article was reviewed
Data extraction	Application of the digital twin	4) Selection is made on the quality assessment
		Application area of the digital twin
		Application setting
		Physical counterpart represented by the digital twin
	Categorization of the digital twin	Phases of the product lifecycle considered
		Subcategory of digital twin used
Quality assessment	QA	Does the study present an application of a digital twin in a use case?

(116 in total) and Operational (56 in total) phases, whereas there are only a small number of publications focusing on Design (14 in total) and Disposal (1 in total).

After having observed the different lifecycle phases of the application of digital twins in the literature, an observation is made, within these lifecycle phases, on what the specific applications of the digital twin are. In order to establish this, the framework proposed by Liu *et al.* was used to classify the set of selected papers. If the application found in one of the reviewed articles is not included in the applications presented before then it will be classified in the category named "other". This method will allow us to identify new applications not yet included in the current classification as defined by Liu *et al.*⁹.

Figure 4 displays the distributions of these domains of application for each application defined in Liu *et al.*⁹'s nomenclature.

Regarding the product lifecycle, as shown in Figure 4, the applications of digital twins are mostly centered on the

Production and Operational phases. The applications of biggest interest are the ones focused on monitoring and control (Real-time monitoring - 26, Production control - 21, State monitoring - 15), on optimization (Production planning - 34, Process evaluation and optimization - 20), and on predictive maintenance (23). These groups of applications appear to be the main focus of research on digital twins.

As mentioned before, this figure also pinpoints an emerging field of application of digital twins not considered within the categories proposed by Liu *et al.*⁹; the Disposal phase. The digital twin is used within the identified paper⁸⁵ as a database containing all the product information, from its manufacturing information (CAD, CAM, ...) to its updates, repairs, change of parts, and so on. This data model then supports end-of-life decisions (Repair, Recondition, Remanufacture, Recycle, ...), here in the context of Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE). This digital twin application for the end-of-life phase of a product lifecycle justifies the need for a new category, which we decided to name "Product End-of-life management" in the end-of-life phase to complete Liu *et al.*⁹'s classification.

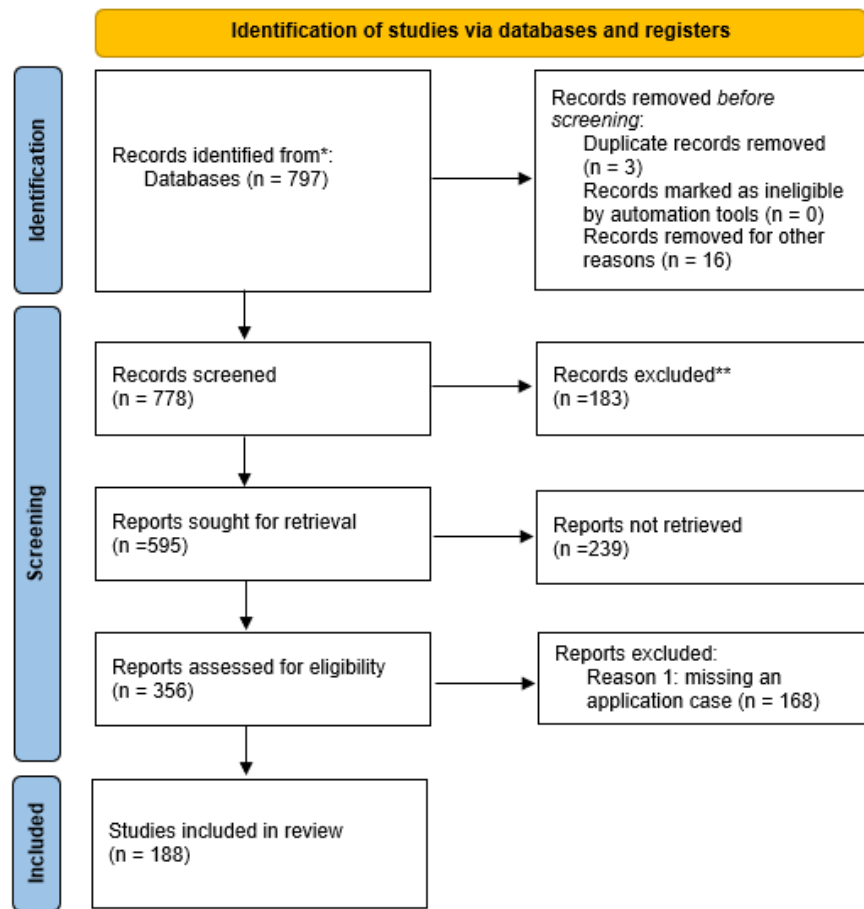


Figure 2. PRISMA 2020 flow diagram of the systematic review protocol.

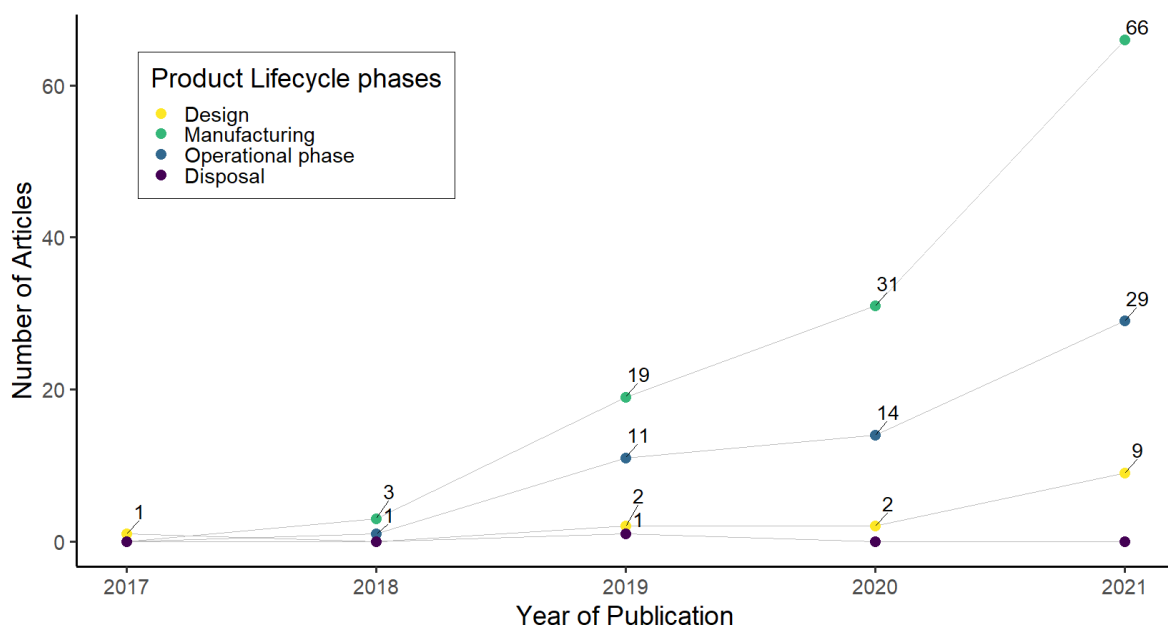


Figure 3. Number of Digital Twin articles in each lifecycle phase per year of publication.

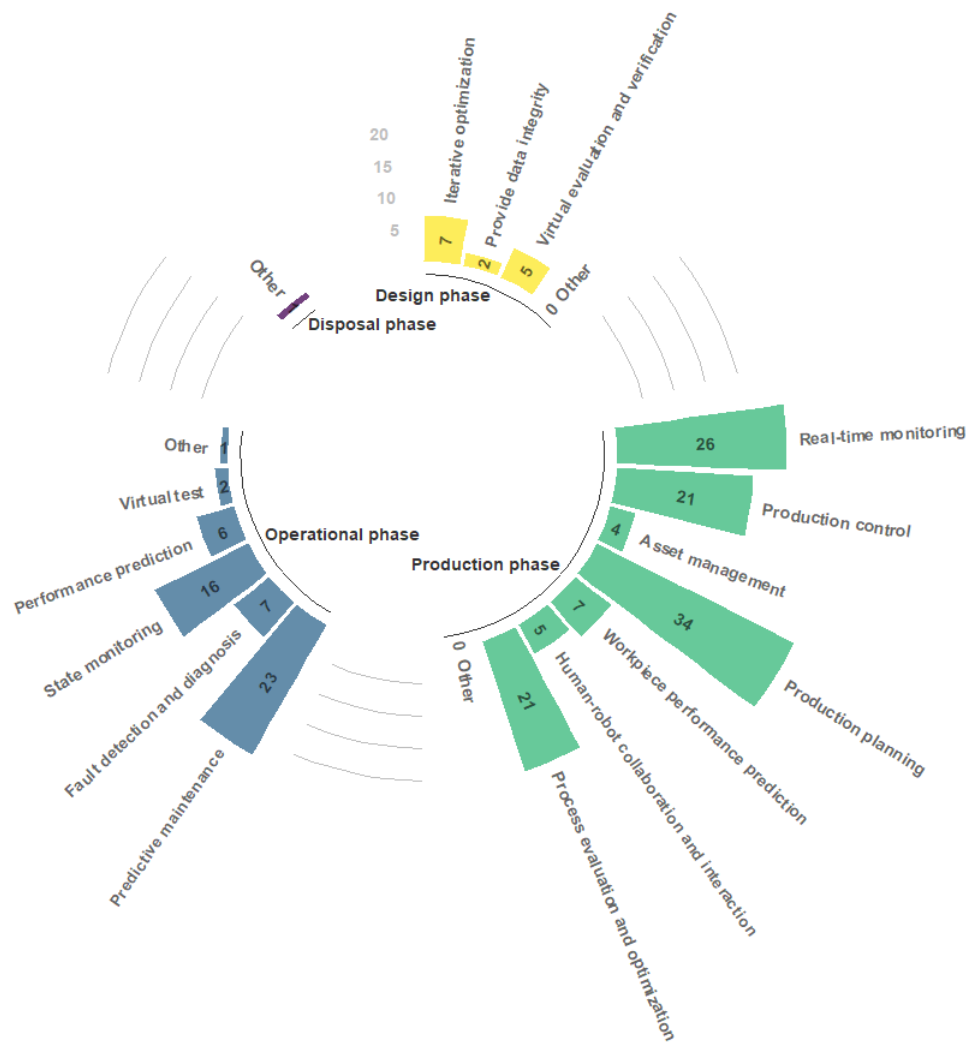


Figure 4. Digital Twin applications in the literature, along the product lifecycle.

Digital twin subcategories along the product lifecycle

As presented in Figure 1, four subcategories of digital twins exist: Pre-Digital Twin (PDT), Digital Model (DM), Digital Shadow (DS) and Digital Twin (DT). Figure 5 presents the distribution of the publications reviewed among these subcategories.

Regarding the interaction structure between the digital and physical objects, a majority (58%) of digital twins in the reviewed literature actually falls under the DS subcategory, underlining the fact that most digital twin applications only consist of an acquisition chain from the physical to the digital realm, and not a command chain from the digital to the physical system, while only 18% are actual DT.

Figure 6 shows the same analysis from the perspective of the lifecycle.

One result from this figure is that almost all the digital twins used in the design phase are PDT or DM. This may seem intuitive, as the physical object is not yet in the production phase, it is complex to acquire product data. We can therefore ask ourselves if and how the use of digital twins could be developed in this design phase. Nevertheless, two articles present the use of a DS in the design phase. Indeed, in these two articles, a physical prototype is created during the design process, in an iterative optimization process. Tests are carried out on these prototypes, equipped with sensors, which allow a real-time visualization of the performance of the prototypes,

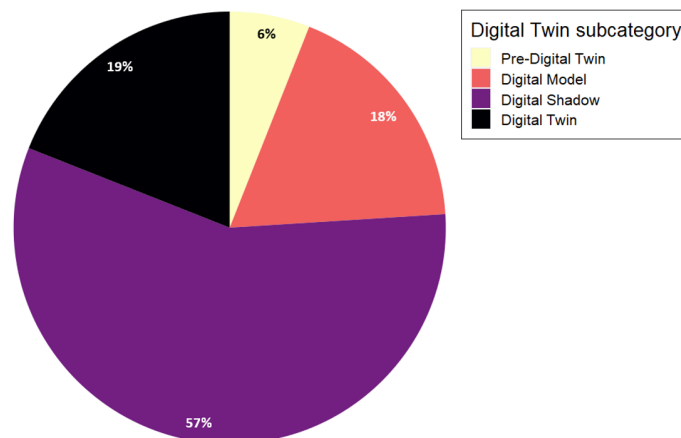


Figure 5. Proportion of each subcategory of digital twin in the reviewed literature.

and thus allow a faster iteration in the design phase. This leads to a possible use of DS and DT in the design phase, as the use of these tools in this phase will allow optimization and time saving during the design iterations.

In addition, it is observed that most DT are used in the production phase, while still not being commonly used in the other phases of the product lifecycle.

To go into deeper detail as to the link between the different digital twin applications and the digital twin subcategories, this study is carried out separately for each application along the product lifecycle. The results are presented in [Figure 7](#).

As seen in this figure, applications focused on monitoring and control present a large majority of the use of DS (real-time monitoring 93%, production control 47%, and state monitoring 80%), due to the lack of necessity for a command loop in these applications, whereas a larger proportion of DT are used in applications focused on optimization (production planning 29%, process evaluation, and optimization 35%).

Discussion

The results of our review of the literature on the applications of digital twins allow us to draw several observations on their uses in Research and Industry. In this section, analysis of the results of the literature review will aim to provide responses to the research questions raised in the methodology, as well as making observations on the current state of research on digital twins, and thus to identify the different research gaps in this domain.

Classification of digital twin applications

From an operational point of view, this study has been centered around use cases for digital twins in the Manufacturing sector reported by the scientific literature. This industry, leading the applications of digital twins, presents applications in most of the defined categories in the classification made

by Liu, and in his updated version proposed in this paper, while other domains of application are almost exclusively focused on a few applications of digital twins. This results in discrepancies between the projects and applications in the different domains of applications of digital twins or even within the same domains and contributes to creating confusion and controversies around the digital twin technology²⁰⁸. As a consequence, a first contribution of this study is the use of a generic classification for digital twins as a part of a larger set of standardizations required in the literature for digital twins²⁰⁹, and its application for the analysis of digital twin use cases.

Moreover, some limitations have been identified towards the classification established by Liu *et al.* and used in this review. Indeed, these are linked to the emergence of the disposal phase. Indeed, as presented [Table 1](#), no applications were identified in the original classification for the digital twin in the Disposal Phase. This was due to the fact that, this lifecycle phase would require deeper research, as we only identified one paper through our screening mentioning this at the time of the study⁸⁵. Due to the appearance of emerging applications in this lifecycle phase, we consider it necessary to include this phase in our review. Therefore, this classification was updated within this paper in the context of the digital twin for Industry to integrate the emerging new applications in this field. On the other hand, new domains of applications have appeared for digital twins, whose applications may not always fit in Liu's classification which was designed for manufacturing industry-oriented applications. Indeed, the classification established by Liu and completed in this paper is still mainly focused on digital twin use cases in the Manufacturing domain.

Digital twin applications along the product lifecycle

As highlighted in [Figure 3](#), despite a large proportion of applications in the Production phase, recently more and more applications are appearing in the Design phase. It can be

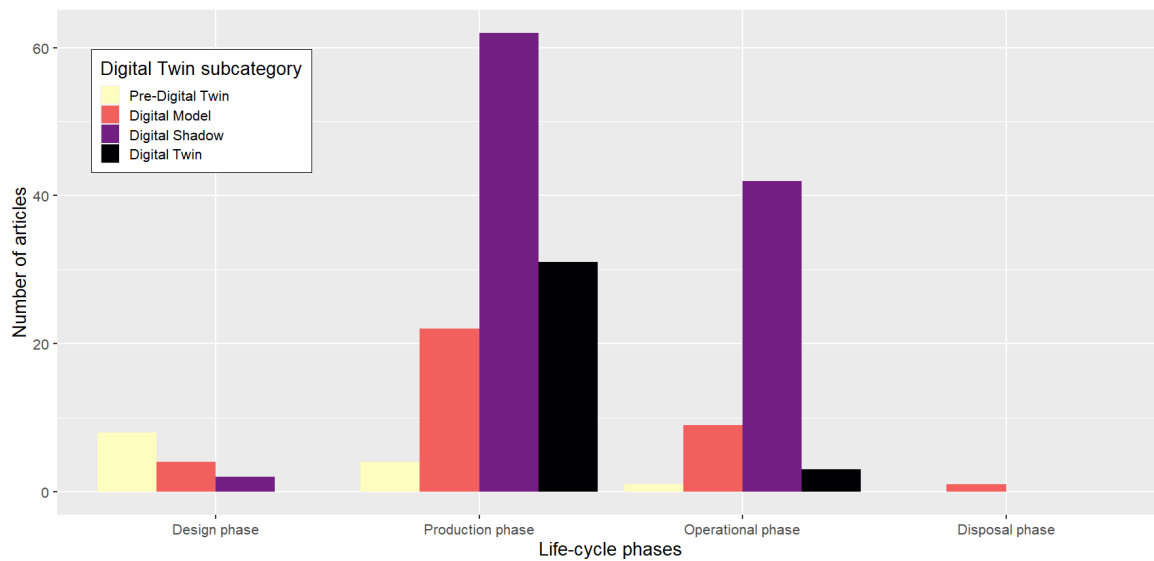


Figure 6. Proportion of each subcategory of digital twin, along the product lifecycle.

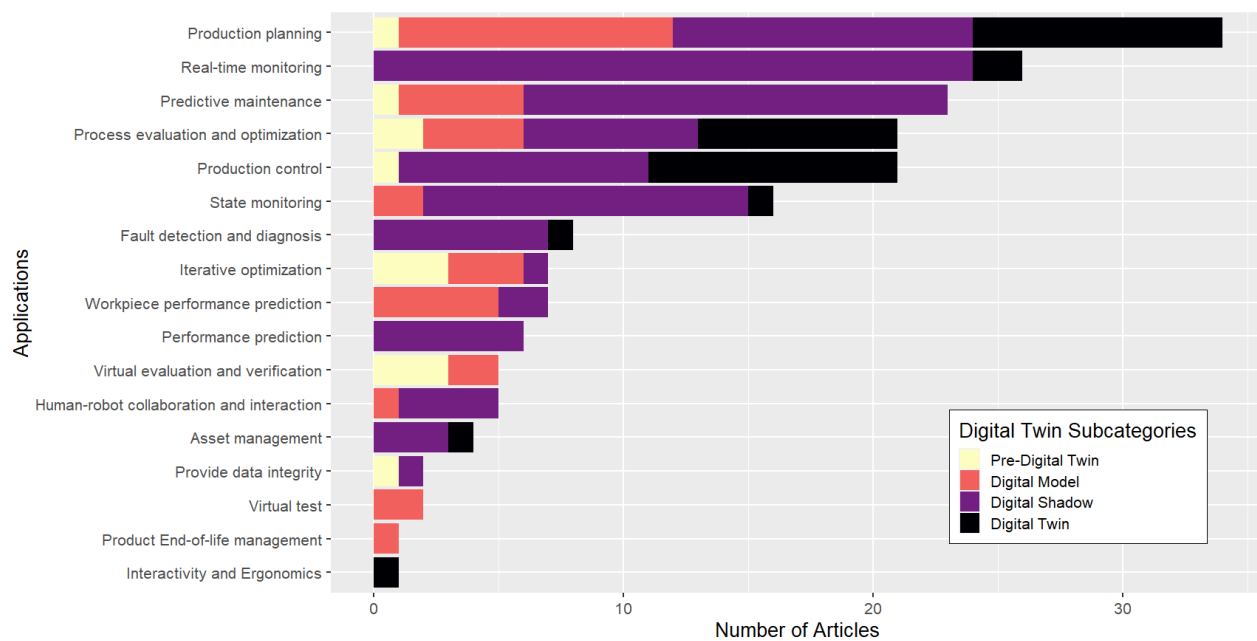


Figure 7. Proportion of each subcategory of digital twin for each application along the product lifecycle.

seen that the development of the digital twins is starting to be extended beyond these few traditional applications, but it remains an emergent development. These emerging works show a lot of potentialities linked to the efficiency of the design process thanks to iterations in “real system” conditions with users, as well as the possibility to enhance “collaborative” design between communities of designers-users for example²¹⁰.

The findings indicate a lack of dedicated applications for digital twins in the disposal phase, emphasizing the need for

increased community effort in developing Digital twin research and applications for managing resources throughout their entire lifecycle, particularly during the end-of-life stage, in light of current energy and raw material scarcity challenges²¹¹. This comprehensive review confirms the analysis of Rasheed *et al.*²⁰⁹ in the sense that there are still barriers to digital twins from a technological standpoint.

Results of this research also show that the twins are mostly used at a local scale, for a specific function defined by an

immediate implementation need. Currently, digital twins are still thought of as add-on solutions, which are attached to a system to improve a particular task, a specific action. This way of thinking, by first building the physical system and then adding the twin, reduces the possibilities of using digital twins and sometimes complicates their implementation (sensors, design, ...) ²¹². This allows us to infer that the industrial actors still need a better understanding of the concept itself and of the implementation process to get the maximum benefit from the implementation of the digital twins. It is necessary to change the way systems and their digital twins are built, by thinking about their design together to maximize their potential. In this context, a recommendation is made for wider research on the use of a “Digital Thread” ²¹³ of the product and its implementation from the beginning (Design phase) to the end (Disposal phase) of the product lifecycle.

Digital twin integration throughout the product lifecycle

The existing body of literature indicates that the development of digital twins is still in its early stages, primarily comprising conceptual papers lacking concrete case studies. On the existing applied case studies, which are the articles examined in this paper, it is apparent that most applications exist at low levels of integration ¹³ such as Digital Models (DM) and Pre Digital Twins (PDT). These categories of digital twins rely on historical data and simulation, rather than relying on real-time data from the physical counterpart. Notably, a majority of research in the realm of DT in manufacturing, as seen in [Figure 4](#), emphasizes addressing production planning and control. These applications constitute significant data sinks within a production system. In this context, simulation is frequently employed to leverage these models effectively.

Yet, digital twin applications, within and beyond manufacturing, encompass applications with higher time frequencies like process control and predictive maintenance, where real-time assessment of the state of the physical counterpart are required; In this context, time-intensive simulations may be bypassed in favor of alternative data-driven approaches. As seen in [Figure 7](#), such applications thus require a higher level of digital twin integration such as Digital Shadows (DS) and Digital Twins (DT).

However, acquiring the relevant data on the physical object can be an issue. Indeed, some information coming from the product to feed the twin can be difficult to obtain in real time. In the case of the manufacturing sector in particular, it can be difficult to represent a product being manufactured by means of sensors during its production. Thus, it is preferred in most of the studied cases of applications found in this review to realize a digital twin not of the manufactured product, but of the production machine carrying out this process. Collecting relevant data on the machine carrying out a manufacturing operation is usually easier to realize. This approach allows to collect information more simply on the state of the machine, which allows deducing the state of the manufactured product by interpolating a model of the machine

with the collected machine data. A limitation of this approach is related to the reliability of the information received on the product by this method, because the accuracy of this information will depend on the accuracy of the underlying model. This notion is related to the study of social barriers and trust in the data and the model, discussed later. This topic of the observability ²¹⁴ of the product during the manufacturing phase by use of digital twin is an ongoing field of research carried out by the authors.

Limitations and perspectives for implementation of Digital Twins along the product lifecycle

From a social acceptance point of view, an issue is raised for data security and ownership. For their operation, digital twins require a large amount of data to feed their models. This raises questions about the notion of privacy and the protection of personal data ^{215,216}. Indeed, as the twin is the result of data captured by sensors and feeding a model, which represents a collaborative work, it can be difficult to define who the owner of the data is.

From a technological standpoint, another issue is raised on data acquisition. As presented in the last subsection, as digital twins' applications are developed towards a higher level of integration, this leverages an increasing need for data acquisition in real-time on the physical counterpart. This questions the reliability of the digital twin, especially when its work must replace a human or help a human decision. This comes down to the question of whether the digital twin is trustworthy ²¹⁷. This means that it must work as expected at all times. The question of the data integrity has been raised in this paper, and further research will explore this topic.

This can be separated into two parts: on the one hand, making sure that the data captured by the digital twin reliably represents the physical system being matched, and on the other hand that the virtual model of this system is sufficiently accurate and reliable. It is therefore necessary to put in place regulations and control procedures for the digital twins, as well as to leave the human in the decision loop, especially when these decisions may involve significant risks, for instance in the case of controlling heavy machinery in contact with human workers. On this aspect, among the applications observed on this review, it appeared that a lack of studies related to the human-digital twin interaction. This aspect will be essential in the coming years to improve the understanding and acceptance of digital twins by operators and process analysts and guaranty the safety and reliance of digital twins.

To finish, [Table 3](#) summarizes the most relevant dimensions that should be tackled by the scientific and industrial communities to catalyze the deployment of digital twins in the manufacturing sector in the years to come.

Conclusion and future work

Since its first appearance twenty years ago, the digital twin concept has received increasing attention in the literature. Its

Table 3. Ideal digital twin Summary in the Manufacturing Sector.

	<i>Current Status of DT</i>	<i>Requirements to further deployment of DT in manufacturing applications</i>
Technological dimension	Complex and sometimes indirect data acquisition Choice between accurate and reliable model and computation cost and time. Digital twins used as add-on to an existing system.	Reliable and precise model designed in parallel with the physical system, allowing to design the physical object thinking about the presence of a Twin, and allowing a direct acquisition of its data. Designing the digital twin alongside its physical counterpart.
Operational dimension	Separation of the applications according to the fields of use of the digital twin. Use of separate tools and methods for different applications and domains.	Creation of a standardization of the methods of realization of the digital twins, allowing a better sharing and a better development of the digital twins collaboratively.
Social dimension	No clear rules regarding data ownership. Trust issues with the data and models used.	Establishment of regulations on data ownership, as well as on the reliability of models and data. Collaborative Human-Twin interaction.

rapid development, mainly in the last decade, has been fostered by the advent of technologies such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence, and advances in sensors and in data processing within Industry 4.0²¹⁸.

This research study aimed to answer three research questions around the concept of digital twins today: What are its application areas? What are its applications along the product lifecycle? What subcategories of digital twins are used for these applications in the literature? In the case of the applications areas, the research is still mainly focused on the domain of the manufacturing industry, but its research development is beginning in an increasing number of sectors, including healthcare, smart cities, or construction.

Although the research on digital twins concerns an increasing number of applications along the product lifecycle, from its design to end-of-life, our results show that most publications are focusing on a small number of applications, mainly monitoring, optimization, and predictive maintenance. The predominance of these functions explains the fact that the majority of the applications of the digital twin in the literature do not present a chain of control from the digital organ to its physical counterpart, but only aim to acquire data from the physical part to feed a model.

Finally, this work has led to a discussion on the design of digital twins, pointing out the disparity of the implementation of the digital twins along the lifecycle of the product. Indeed, most of the digital twin implementations were realized after the system was already produced or in use, and the digital twin was implemented afterwards as an add-on, resulting in implementation operations.

This original quantitative analysis allows us to draw a portrait of the issues at stake in this hot topic, which is widely mobilized at least in terms of publication, but which sometimes suffers from imprecision. This work reveals the research tracks that should be investigated around the digital twin. An agenda for researchers is thus established.

A limitation of this study is that it focuses only on the artefacts grouped under the name of digital twin. Indeed, before these artefacts were given this name, previous research on these objects had begun in product lifecycle management (PLM) as an emulation of the operating part²¹⁹. Also, as today the application of DT starts to extend beyond manufacturing, encompassing domains with other struggles and needs for digital twin application, a broader means of applications classification may be required. This particular point has not been tackled in this paper, as it focuses on manufacturing applications, but could constitute a new body of research on digital twins in the next few years.

Data availability

Figshare. Digital twins along the product lifecycle product lifecycle: a systematic literature review of applications in manufacturing, [10.6084/m9.figshare.21941033](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.21941033)²⁰⁷

This project contains the following underlying data:

Data file 1. (Analysis table for this review, presenting the screened articles and their analysis based on the classifications presented in this paper)

Data are available under the terms of the [Creative Commons Four “No rights reserved” data waiver \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

References

- Qi Q, Tao F: **Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison.** *IEEE Access.* 2018; **6**: 3585–3593. [Publisher Full Text](#)
- Qi Q, Tao F, Hu T, et al.: **Enabling technologies and tools for digital twin.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 3–21. [Publisher Full Text](#)
- Ahleroff S, Mostashiri N, Xu X, et al.: **Mass Personalisation as a Service in Industry 4.0: A Resilient Response Case Study.** *Adv Eng Informatics.* 2021; **50**: 101438. [Publisher Full Text](#)
- Tao F, Sui F, Liu A, et al.: **Digital twin-driven product design framework.** *Int J Prod Res.* 2019; **57**(12): 3935–3953. [Publisher Full Text](#)
- Lo CK, Chen CH, Zhong RY: **A review of digital twin in product design and development.** *Adv Eng Informatics.* 2021; **48**(9): 101297. [Publisher Full Text](#)
- Cimino C, Negri E, Fumagalli L: **Review of digital twin applications in manufacturing.** *Comput Ind.* 2019; **113**: 103130. [Publisher Full Text](#)
- Errandonea I, Beltrán S, Arrizabalaga S: **Digital Twin for maintenance: A literature review.** *Comput Ind.* 2020; **123**: 103316. [Publisher Full Text](#)
- Semeraro C, Lezoche M, Panetto H, et al.: **Digital twin paradigm: A systematic literature review.** *Comput Ind.* 2021; **130**: 103469. [Publisher Full Text](#)
- Liu M, Fang S, Dong H, et al.: **Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**: 346–361. [Publisher Full Text](#)
- Glaessgen EH, Stargel DS: **The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles.** *Collect Tech Pap - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct Dyn Mater Conf.* 2012; 1–14. [Publisher Full Text](#)
- Croatti A, Gabellini M, Montagna S, et al.: **On the Integration of Agents and Digital Twins in Healthcare.** *J Med Syst.* 2020; **44**(9): 161. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
- Farsi M, Daneshkhah A, Hosseinian-Far A, et al.: **Digital Twin Technologies and Smart Cities.** *Internet of Things.* 2020. [Publisher Full Text](#)
- Kritzing W, Karner M, Traar G, et al.: **Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification.** *IFAC-PapersOnLine.* 2018; **51**(11): 1016–1022. [Publisher Full Text](#)
- Phanden RK, Sharma P, Dubey A: **A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics.** *Mater Today Proc.* 2021; **38**(Part 1): 174–178. [Publisher Full Text](#)
- Opoku DGJ, Perera S, Osei-Kyei R, et al.: **Digital twin application in the construction industry: A literature review.** *J Build Eng.* 2021; **40**: 102726. [Publisher Full Text](#)
- Madni AM, Madni CC, Lucero SD: **Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering.** *Systems.* 2019; **7**(1): 7. [Publisher Full Text](#)
- Pronost G, Mayer F, Marche B, et al.: **Towards a Framework for the Classification of Digital Twins and their Applications.** *2021 IEEE Int Conf Eng Technol Innov ICE/ITMC 2021 - Proc.* 2021. [Publisher Full Text](#)
- Siddaway AP, Wood AM, Hedges LV: **How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses.** *Annu Rev Psychol.* 2019; **70**: 747–770. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#)
- Cruz Sanchez FA, Boudaoud H, Camargo M, et al.: **Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy.** *J Clean Prod.* 2020; **264**: 121602. [Publisher Full Text](#)
- Toothman M, Braun B, Bury SJ, et al.: **A Digital Twin Framework for Mechanical System Health State Estimation.** *IFAC-PapersOnLine.* 2021; **54**(20): 1–7. [Publisher Full Text](#)
- Douthwaite JA, Lesage B, Gleirscher M, et al.: **A Modular Digital Twinning Framework for Safety Assurance of Collaborative Robotics.** *Front Robot AI.* 2021; **8**: 758099. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
- Protner J, Pipan M, Zupan H, et al.: **Edge computing and digital twin based smart manufacturing.** *IFAC-PapersOnLine.* 2021; **54**(1): 831–836. [Publisher Full Text](#)
- Ghandar A, Ahmed A, Zulfiqar S, et al.: **A decision support system for urban agriculture using digital twin: A case study with aquaponics.** *IEEE Access.* 2021; **9**: 35691–35708. [Publisher Full Text](#)
- Xu LZ, Xie QS: **Dynamic production scheduling of digital twin job-shop based on edge computing.** *J Inf Sci Eng.* 2021; **37**(1): 93–105. [Reference Source](#)
- Yu G, Zhang S, Hu M, et al.: **Prediction of highway tunnel pavement performance based on digital twin and multiple time series stacking.** *Adv Civ Eng.* 2020; **2020**: 8824135. [Publisher Full Text](#)
- Barni A, Pietraroia D, Züst S, et al.: **Digital twin based optimization of a manufacturing execution system to handle high degrees of customer specifications.** *J Manuf Mater Process.* 2020; **4**(4): 109. [Publisher Full Text](#)
- Peng Y, Zhang M, Yu F, et al.: **Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration.** *Adv Civ Eng.* 2020; **2020**: 8846667. [Publisher Full Text](#)
- Zhang T, Li Y, Cai J, et al.: **A Digital Twin for Unconventional Reservoirs: A Multiscale Modeling and Algorithm to Investigate Complex Mechanisms.** *Geofluids.* 2020; **2020**: 8876153. [Publisher Full Text](#)
- Dli M, Puchkov A, Meshalkin V, et al.: **Energy and Resource Efficiency in Apatite-Nepheline Ore Waste Processing Using the Digital Twin Approach.** *Energies.* 2020; **13**(21): 5829. [Publisher Full Text](#)
- Yu J, Liu P, Li Z: **Hybrid modelling and digital twin development of a steam turbine control stage for online performance monitoring.** *Renew Sustain Energy Rev.* 2020; **133**: 110077. [Publisher Full Text](#)
- Negri E, Pandhare V, Cattaneo L, et al.: **Field-synchronized Digital Twin framework for production scheduling with uncertainty.** *J Intell Manuf.* 2021; **32**(4): 1207–1228. [Publisher Full Text](#)
- Wang Q, Jiao W, Zhang YM: **Deep learning-empowered digital twin for visualized weld joint growth monitoring and penetration control.** *J Manuf Syst.* 2020; **57**: 429–439. [Publisher Full Text](#)
- da Cunha C, Cardin O, Gallot G, et al.: **Designing the digital twins of reconfigurable manufacturing systems: Application on a smart factory.** *IFAC-PapersOnLine.* 2021; **54**(1): 874–879. [Publisher Full Text](#)
- Kaewunruen S, Peng S, Phil-Ebosie O: **Digital twin aided sustainability and vulnerability audit for subway stations.** *Sustain.* 2020; **12**(19): 7873. [Publisher Full Text](#)
- Klepzig LS, Juckers A, Knerr P, et al.: **Digital twin for lyophilization by process modeling in manufacturing of biologics.** *Processes.* 2020; **8**(10): 1325. [Publisher Full Text](#)
- Luo W, Hu T, Ye Y, et al.: **A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin.** *Robot Comput Integr Manuf.* 2020; **65**: 101974. [Publisher Full Text](#)
- Yu B, Xie H, Chen L, et al.: **Exploration of Digital Twin Design Mechanism of the Deep in Situ Rock Insulation Coring Device.** *Geofluids.* 2020; **2020**: 8835085. [Publisher Full Text](#)
- Hürkamp A, Gellrich S, Ossowski T, et al.: **Combining simulation and machine learning as digital twin for the manufacturing of overmolded thermoplastic composites.** *J Manuf Mater Process.* 2020; **4**(3): 92. [Publisher Full Text](#)
- Bambura R, Šolc M, Dado M, et al.: **Implementation of digital twin for engine block manufacturing processes.** *Appl Sci.* 2020; **10**(18): 6578. [Publisher Full Text](#)
- Liang B, Liu W, Liu K, et al.: **A displacement field perception method for component digital twin in aircraft assembly.** *Sensors (Switzerland).* 2020; **20**(18): 5161. [Publisher Full Text](#)
- Saad A, Faddel S, Mohammed O: **IoT-based digital twin for energy cyber-physical systems: design and implementation.** *Energies.* 2020; **13**(18): 4762. [Publisher Full Text](#)
- Farah SO, et al.: **Digital twin by DEM for ball bearing operating under EHD conditions To cite this version : HAL Id : hal-02913931 M mechanics Digital twin by DEM for ball bearing operating under EHD conditions.** 2020.
- Shangguan D, Chen L, Ding J: **A digital twin-based approach for the fault diagnosis and health monitoring of a complex satellite system.** *Symmetry (Basel).* 2020; **12**(8): 1307. [Publisher Full Text](#)
- Xu L, Yan S, Chen Z, et al.: **Design of the Museum Interactive Lighting System Based on the Digital Twin Technology.** *Sci Program.* 2021; **2021**: 4824417. [Publisher Full Text](#)
- Oyekan J, Farnsworth M, Hutabarat W, et al.: **Applying a 6 DoF Robotic Arm**

- and Digital Twin to Automate Fan-Blade Reconditioning for Aerospace Maintenance, Repair, and Overhaul. *Sensors (Basel)*. 2020; **20**(16): 4637. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
46. Liu C, Jiang P, Jiang W: **Web-based digital twin modeling and remote control of cyber-physical production systems.** *Robot Comput Integr Manuf*. 2020; **64**: 101956. [Publisher Full Text](#)
 47. Zheng P, Sivabalan AS: **A generic tri-model-based approach for product-level digital twin development in a smart manufacturing environment.** *Robot Comput Integr Manuf*. 2020; **64**: 101958. [Publisher Full Text](#)
 48. Cao X, Zhao G, Xiao W: **Digital Twin-oriented real-time cutting simulation for intelligent computer numerical control machining.** *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf*. 2020; **236**(1–2): 5–15. [Publisher Full Text](#)
 49. Bécue A, Maia E, Feeken L, et al.: **A new concept of digital twin supporting optimization and resilience of factories of the future.** *Appl Sci*. 2020; **10**(13): 4482. [Publisher Full Text](#)
 50. Ashtari Talkhestani B, Weyrich M: **Digital Twin of manufacturing systems: A case study on increasing the efficiency of reconfiguration.** *At-Autom*. 2020; **68**(6): 435–444. [Publisher Full Text](#)
 51. Guo D, Zhong RY, Lin P, et al.: **Digital twin-enabled Graduation Intelligent Manufacturing System for fixed-position assembly islands.** *Robot Comput Integr Manuf*. 2020; **63**: 101917. [Publisher Full Text](#)
 52. Jiewu L, Qiang L, Shide Y, et al.: **Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model.** *Robot Comput Integr Manuf*. 2020; **63**: 101895. [Publisher Full Text](#)
 53. Park KT, Lee D, Do Noh S: **Operation Procedures of a Work-Center-Level Digital Twin for Sustainable and Smart Manufacturing.** *Int J Precis Eng Manuf - Green Technol*. 2020; **7**(3): 791–814. [Publisher Full Text](#)
 54. Pérez L, Rodríguez-Jiménez S, Rodríguez N, et al.: **Digital twin and virtual reality based methodology for multi-robot manufacturing cell commissioning.** *Appl Sci*. 2020; **10**(10): 3633. [Publisher Full Text](#)
 55. Bamunurachchi D, Georgakopoulos D, Banerjee A, et al.: **Digital twins supporting efficient digital industrial transformation.** *Sensors (Basel)*. 2021; **21**(20): 6829. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
 56. Židek K, Pítel' J, Adámek M, et al.: **Digital twin of experimental smart manufacturing assembly system for industry 4.0 concept.** *Sustain*. 2020; **12**(9): 3658. [Publisher Full Text](#)
 57. Cheng J, Zhang H, Tao F, et al.: **DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing.** *Robot Comput Integr Manuf*. 2020; **62**: 101881. [Publisher Full Text](#)
 58. Zhang C, Zhou G, Hu J, et al.: **Deep learning-enabled intelligent process planning for digital twin manufacturing cell.** *Knowledge-Based Syst*. 2020; **191**: 105247. [Publisher Full Text](#)
 59. Karve PM, Guo Y, Kapusuzoglu B, et al.: **Digital twin approach for damage-tolerant mission planning under uncertainty.** *Eng Fract Mech*. 2020; **225**: 106766. [Publisher Full Text](#)
 60. Seon G, Nikishkov Y, Makeev A, et al.: **Towards a digital twin for mitigating void formation during debulking of autoclave composite parts.** *Eng Fract Mech*. 2020; **225**: 106792. [Publisher Full Text](#)
 61. Xuemin S, Jinsong B, Jie L, et al.: **A digital twin-driven approach for the assembly-commissioning of high precision products.** *Robot Comput Integr Manuf*. 2020; **61**: 101839. [Publisher Full Text](#)
 62. Novák P, Vyskočil J, Wally B: **The digital twin as a core component for industry 4.0 smart production planning.** *IFAC-PapersOnLine*. 2020; **53**(2): 10803–10809. [Publisher Full Text](#)
 63. Howard DA, Ma Z, Aaslyng JM, et al.: **Data Architecture for Digital Twin of Commercial Greenhouse Production.** *Proc - 2020 RIVF Int Conf Comput Commun Technol RIVF* 2020. 2020. [Publisher Full Text](#)
 64. Khajavi SH, Jaribon A, Knapen A, et al.: **Digital Twin for Safety and Comfort: A Case Study of Sauna.** *IECON Proc (Industrial Electron Conf)*. 2020; 167–172. [Publisher Full Text](#)
 65. Qi B, Park HS: **Data-driven digital twin model for predicting grinding force.** *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2020; **916**(1): 012092. [Publisher Full Text](#)
 66. Tu X, Autiosalo J, Jadid A, et al.: **A mixed reality interface for a digital twin based crane.** *Appl Sci*. 2021; **11**(20): 9480. [Publisher Full Text](#)
 67. Hu C, Shi W, Jiang L: **Application case of digital twin technology in electric power system.** *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2020; **788**(1): 012083. [Publisher Full Text](#)
 68. He Y, Zhang N, Wang A: **Digital twin process and simulation operation control technology for intelligent manufacturing unit.** *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2020; **836**(1): 012010. [Publisher Full Text](#)
 69. González M, Salgado O, Croes J, et al.: **A Digital Twin for Operational Evaluation of Vertical Transportation Systems.** *IEEE Access*. 2020; **8**: 114389–114400. [Publisher Full Text](#)
 70. Zhang S, Kang C, Liu Z, et al.: **A Product Quality Monitor Model with the Digital Twin Model and the Stacked Auto Encoder.** *IEEE Access*. 2020; **8**: 113826–113836. [Publisher Full Text](#)
 71. Moyné J, Qamsane Y, Balta EC, et al.: **A Requirements Driven Digital Twin Framework: Specification and Opportunities.** *IEEE Access*. 2020; **8**: 107781–107801. [Publisher Full Text](#)
 72. Barricelli BR, Casiraghi E, Gliozzo J, et al.: **Human Digital Twin for Fitness Management.** *IEEE Access*. 2020; **8**: 26637–26664. [Publisher Full Text](#)
 73. Zhao P, Liu J, Jing X, et al.: **The Modeling and Using Strategy for the Digital Twin in Process Planning.** *IEEE Access*. 2020; **8**: 41229–41245. [Publisher Full Text](#)
 74. Park KT, Lee J, Kim HJ, et al.: **Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production.** *Int J Adv Manuf Technol*. 2020; **106**(5–6): 1787–1810. [Publisher Full Text](#)
 75. Fera M, Greco A, Caterino M, et al.: **Towards digital twin implementation for assessing production line performance and balancing.** *Sensors (Basel)*. 2019; **20**(1): 97. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
 76. Zhang T, Liu X, Luo Z, et al.: **Time series behavior modeling with digital twin for Internet of Vehicles.** *Eurasip J Wirel Commun Netw*. 2019; **2019**(1): 271. [Publisher Full Text](#)
 77. Guo D, Zhong RY, Rong Y, et al.: **Synchronization of Shop-Floor Logistics and Manufacturing Under IIoT and Digital Twin-Enabled Graduation Intelligent Manufacturing System.** *IEEE Trans Cybern*. 2023; **53**(3): 2005–2016. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#)
 78. He R, Chen G, Dong C, et al.: **Data-driven digital twin technology for optimized control in process systems.** *ISA Trans*. 2019; **95**: 221–234. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#)
 79. Fang Y, Peng C, Lou P, et al.: **Digital-Twin-Based Job Shop Scheduling Toward Smart Manufacturing.** *IEEE T Ind Inform*. 2019; **15**(12): 6425–6435. [Publisher Full Text](#)
 80. Min Q, Lu Y, Liu Z, et al.: **Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry.** *Int J Inf Manage*. 2019; **49**: 502–519. [Publisher Full Text](#)
 81. Aivaliotis P, Georgoulas K, Chrysosolouris G: **The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing.** *Int J Comput Integr Manuf*. 2019; **32**(11): 1067–1080. [Publisher Full Text](#)
 82. Havard V, Jeanne B, Lacomblez M, et al.: **Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations.** *Prod Manuf Res*. 2019; **7**(1): 472–489. [Publisher Full Text](#)
 83. Wang J, Huang Y, Chang Q, et al.: **Event-driven online machine state decision for energy-efficient manufacturing system based on digital twin using Max-plus Algebra.** *Sustain*. 2019; **11**(18): 5036. [Publisher Full Text](#)
 84. Zhang X, Zhu W: **Application framework of digital twin-driven product smart manufacturing system: A case study of aeroengine blade manufacturing.** *Int J Adv Robot Syst*. 2019; **16**(5): 1–16. [Publisher Full Text](#)
 85. Wang XV, Wang L: **Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0.** *Int J Prod Res*. 2019; **57**(12): 3892–3902. [Publisher Full Text](#)
 86. Liu Q, Zhang H, Leng J, et al.: **Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system.** *Int J Prod Res*. 2019; **57**(12): 3903–3919. [Publisher Full Text](#)
 87. Li Y, Chang D, Gao Y, et al.: **Automated Container Terminal Production Operation and Optimization via an AdaBoost-Based Digital Twin Framework.** *J Adv Transp*. 2021; **2021**: 1936764. [Publisher Full Text](#)
 88. Shim CS, Dang NS, Lon S, et al.: **Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model.** *Struct Infrastruct E*. 2019; **15**(10): 1319–1332. [Publisher Full Text](#)
 89. Zhou G, Zhang C, Li Z, et al.: **Knowledge-driven digital twin manufacturing**

- cell towards intelligent manufacturing. *Int J Prod Res.* 2020; **58**(4): 1034–1051. [Publisher Full Text](#)
90. Park KT, Nam YW, Lee HS, et al.: **Design and implementation of a digital twin application for a connected micro smart factory.** *Int J Comput Integr Manuf.* 2019; **32**(6): 596–614. [Publisher Full Text](#)
 91. Luo W, Hu T, Zhang C, et al.: **Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy.** *J Amb Intel Hum Comp.* 2019; **10**(3): 1129–1140. [Publisher Full Text](#)
 92. Leng J, Zhang H, Yan D, et al.: **Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop.** *J Amb Intel Hum Comp.* 2019; **10**(3): 1155–1166. [Publisher Full Text](#)
 93. Guo J, Zhao N, Sun L, et al.: **Modular based flexible digital twin for factory design.** *J Amb Intel Hum Comp.* 2019; **10**(3): 1189–1200. [Publisher Full Text](#)
 94. Kannan K, Arunachalam N: **A Digital Twin for Grinding Wheel: An Information Sharing Platform for Sustainable Grinding Process.** *J Manuf Sci E-T ASME.* 2019; **141**(2): 021015. [Publisher Full Text](#)
 95. Rajesh PK, Manikandan N, Ramshankar CS, et al.: **Digital Twin of an Automotive Brake Pad for Predictive Maintenance.** *Procedia Comput Sci.* 2019; **165**(2019): 18–24. [Publisher Full Text](#)
 96. Zhang C, Xu W, Liu J: **A reconfigurable modeling approach for digital twin-based manufacturing system.** *Proc CIRP.* 2019; **83**: 118–125. [Publisher Full Text](#)
 97. Zhang C, Zhou G, He J, et al.: **A data- And knowledge-driven framework for digital twin manufacturing cell.** *Proc CIRP.* 2019; **83**: 345–350. [Publisher Full Text](#)
 98. Shen F, Ren SS, Zhang XY, et al.: **A Digital Twin-Based Approach for Optimization and Prediction of Oil and Gas Production.** *Math Probl Eng.* 2021; **2021**: 3062841. [Publisher Full Text](#)
 99. Zhang C, Ji W: **Digital twin-driven carbon emission prediction and low-carbon control of intelligent manufacturing job-shop.** *Proc CIRP.* 2019; **83**: 624–629. [Publisher Full Text](#)
 100. Zhu Z, Liu C, Xu X: **Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality.** *Proc CIRP.* 2019; **81**: 898–903. [Publisher Full Text](#)
 101. Xiang F, Zhang Z, Zuo Y, et al.: **Digital twin driven green material optimal-selection towards sustainable manufacturing.** *Proc CIRP.* 2019; **81**: 1290–1294. [Publisher Full Text](#)
 102. Qiao Q, Wang J, Ye L, et al.: **Digital twin for machining tool condition prediction.** *Proc CIRP.* 2019; **81**: 1388–1393. [Publisher Full Text](#)
 103. Johansen SS, Nejad AR: **On digital twin condition monitoring approach for drivetrains in marine applications.** *Proc Int Conf Offshore Mech Arct Eng - OMAE.* 2019; **10**: 1–10. [Publisher Full Text](#)
 104. Ait-Alla A, Kreutz M, Rippel D, et al.: **Simulation-based Analysis of the Interaction of a Physical and a Digital Twin in a Cyber-Physical Production System.** *IFAC-PapersOnLine.* 2019; **52**(13): 1331–1336. [Publisher Full Text](#)
 105. Khajavi SH, Motlagh NH, Jaribion A, et al.: **Digital Twin: Vision, benefits, boundaries, and creation for buildings.** *IEEE Access.* 2019; **7**: 147406–147419. [Publisher Full Text](#)
 106. Cattaneo L, MacChi M: **A Digital Twin Proof of Concept to Support Machine Prognostics with Low Availability of Run-To-Failure Data.** *IFAC-PapersOnLine.* 2019; **52**(10): 37–42. [Publisher Full Text](#)
 107. Halenar I, Juhas M, Juhasova B, et al.: **Virtualization of production using digital twin technology.** *Proc 2019 20th Int Carpathian Control Conf ICCS 2019.* 2019; **1**–5. [Publisher Full Text](#)
 108. Uzun M, Umut Demirezen M, Koyuncu E, et al.: **Design of a Hybrid Digital-Twin Flight Performance Model Through Machine Learning.** *IEEE Aerosp Conf Proc.* 2019. [Publisher Full Text](#)
 109. Chuang W, Guanghui Z, Junsheng W: **Smart cyber-physical production system enabled workpiece production in digital twin job shop.** *Adv Mech Eng.* 2021; **13**(9): 1–15. [Publisher Full Text](#)
 110. Biesinger F, Meike D, Kraß B, et al.: **A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin.** *Procedia CIRP.* 2019; **79**: 355–360. [Publisher Full Text](#)
 111. Ngo D, Guerra-Zubiaga DA, González-Badillo G, et al.: **Towards a Digital Twin for Cloud Manufacturing: Case Study.** In: *Advanced Manufacturing.* 2018; **2**: 1–12. [Publisher Full Text](#)
 112. Xu Y, Sun Y, Liu X, et al.: **A Digital-Twin-Assisted Fault Diagnosis Using Deep Transfer Learning.** *IEEE Access.* 2019; **7**(c): 19990–19999. [Publisher Full Text](#)
 113. Urbina Coronado PD, Lynn R, Louchichi W, et al.: **Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system.** *J Manuf Syst.* 2018; **48**: 25–33. [Publisher Full Text](#)
 114. Biesinger F, Meike D, Kraß B, et al.: **A Case Study for a Digital Twin of Body-in-White Production Systems General Concept for Automated Updating of Planning Projects in the Digital Factory.** *IEEE Int Conf Emerg Technol Fact Autom ETFA.* 2018; **19**–26. [Publisher Full Text](#)
 115. Luo W, Hu T, Zhu W, et al.: **Digital twin modeling method for CNC machine tool.** *ICNSC 2018 - 15th IEEE Int Conf Networking Sens Control.* 2018; **1**–4. [Publisher Full Text](#)
 116. Botkina D, Hedlind M, Olsson B, et al.: **Digital Twin of a Cutting Tool.** *Procedia CIRP.* 2018; **72**: 215–218. [Publisher Full Text](#)
 117. Zhang H, Liu Q, Chen X, et al.: **A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line.** *IEEE Access.* 2017; **5**: 26901–26911. [Publisher Full Text](#)
 118. Trauer J, Pfingstl S, Finsterer M, et al.: **Improving production efficiency with a digital twin based on anomaly detection.** *Sustain.* 2021; **13**(18): 10155. [Publisher Full Text](#)
 119. Nie Q, Tang D, Zhu H, et al.: **A multi-agent and internet of things framework of digital twin for optimized manufacturing control.** *Int J Comput Integr Manuf.* 2022; **35**(10–11): 1205–1226. [Publisher Full Text](#)
 120. Augustyn D, Ulriksen MD, Sørensen JD: **Reliability Updating of Offshore Wind Substructures by Use of Digital Twin Information.** *Energies.* 2021; **14**(18): 5859. [Publisher Full Text](#)
 121. Ward R, Sun C, Dominguez-Caballero J, et al.: **Machining Digital Twin using real-time model-based simulations and lookahead function for closed loop machining control.** *Int J Adv Manuf Technol.* 2021; **117**(11–12): 3615–3629. [Publisher Full Text](#)
 122. Ward R, Soulatiantork P, Finneran S, et al.: **Real-time vision-based multiple object tracking of a production process: Industrial digital twin case study.** *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf.* 2021; **235**(11): 1861–1872. [Publisher Full Text](#)
 123. Liu J, Cao X, Zhou H, et al.: **A digital twin-driven approach towards traceability and dynamic control for processing quality.** *Adv Eng Informatics.* 2021; **50**: 101395. [Publisher Full Text](#)
 124. Bai Y, You JB, Lee IK: **Design and optimization of smart factory control system based on digital twin system model.** *Math Probl Eng.* 2021; **2021**: 2596946. [Publisher Full Text](#)
 125. Zhuang K, Shi Z, Sun Y, et al.: **Digital twin-driven tool wear monitoring and predicting method for the turning process.** *Symmetry (Basel).* 2021; **13**(8): 1438. [Publisher Full Text](#)
 126. He F, Ong SK, Nee AYC: **An integrated mobile augmented reality digital twin monitoring system.** *Computers.* 2021; **10**(8): 99. [Publisher Full Text](#)
 127. Ghosh AK, Ullah AS, Teti R, et al.: **Developing sensor signal-based digital twins for intelligent machine tools.** *J Ind Inf Integr.* 2021; **24**: 100242. [Publisher Full Text](#)
 128. Li M, Li Z, Huang X, et al.: **Blockchain-based digital twin sharing platform for reconfigurable socialized manufacturing resource integration.** *Int J Prod Econ.* 2021; **240**: 108223. [Publisher Full Text](#)
 129. Vrabčič R, Erkoynucu JA, Farsi M, et al.: **An intelligent agent-based architecture for resilient digital twins in manufacturing.** *CIRP Ann.* 2021; **70**(1): 349–352. [Publisher Full Text](#)
 130. Maruyama T, Ueshiba T, Tada M, et al.: **Digital twin-driven human robot collaboration using a digital human.** *Sensors (Basel).* 2021; **21**(24): 8266. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
 131. Yujun L, Zhichang Z, Wei W, et al.: **Digital twin product lifecycle system dedicated to the constant velocity joint.** *Comput Electr Eng.* 2021; **93**: 107264. [Publisher Full Text](#)
 132. Lu Y, Shevtshenko E, Wang Y: **Physics-based compressive sensing to enable digital twins of additive manufacturing processes.** *J Comput Inf Sci Eng.* 2021; **21**(3): 031009. [Publisher Full Text](#)
 133. Masison J, Beezley J, Mei Y, et al.: **A modular computational framework for medical digital twins.** *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2021; **118**(20): e2024287118. [PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
 134. Kousi N, Gkournelos C, Aivaliotis S, et al.: **Digital twin for designing and reconfiguring human–robot collaborative assembly lines.** *Appl Sci.* 2021; **11**(10): 4620. [Publisher Full Text](#)

135. Leng J, Zhou M, Xiao Y, et al.: **Digital twins-based remote semi-physical commissioning of flow-type smart manufacturing systems.** *J Clean Prod.* 2021; **306**: 127278.
[PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
136. Reed S, Löfstrand M, Andrews J: **Modelling stochastic behaviour in simulation digital twins through neural nets.** *J Simul.* 2022; **16**: 512–525.
[Publisher Full Text](#)
137. Meža S, Pranjić AM, Vežočnik R, et al.: **Digital Twins and Road Construction Using Secondary Raw Materials.** *J Adv Transp.* 2021; **2021**: 8833058.
[Publisher Full Text](#)
138. Braun J, Lima J, Costa P, et al.: **Robot@Factory lite competition: A digital twin approach for the AGV.** *Proc 11th Int Conf Simul Model Methodol Technol Appl SIMULTECH 2021.* 2021; 311–318.
[Publisher Full Text](#)
139. de Areujo JCAA, Villanueva JMM, de Almeida RJS, et al.: **Digital twins of the water cooling system in a power plant based on fuzzy logic.** *Sensors.* 2021; **21**(20): 6737.
[Publisher Full Text](#)
140. Øien CD, Dahl H, Dransfeld S: **A Digital Twin Implementation for Manufacturing Based on Open-Source Software and Standard Control Systems.** *IFIP Adv Inf Commun Technol.* 2021; **633**: 284–291.
[Publisher Full Text](#)
141. Chen C, Zhao Z, Xiao J, et al.: **A conceptual framework for estimating building embodied carbon based on digital twin technology and life cycle assessment.** *Sustain.* 2021; **13**(24): 13875.
[Publisher Full Text](#)
142. Dreyer N, Nicolet C, Gaspoz A, et al.: **Monitoring 4.0 of penstocks: Digital twin for fatigue assessment.** *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2021; **774**(1): 012009.
[Publisher Full Text](#)
143. Tran TA, Ruppert T, Eigner G, et al.: **Real-time locating system and digital twin in Lean 4.0.** *SACI 2021 - IEEE 15th Int Symp Appl Comput Intell Informatics, Proc.* 2021; 00369–00374.
[Publisher Full Text](#)
144. Li L, Gu F, Li H, et al.: **Digital Twin Bionics: A Biological Evolution-Based Digital Twin Approach for Rapid Product Development.** *IEEE Access.* 2021; **9**: 121507–121521.
[Publisher Full Text](#)
145. Liu J, Yu D, Hu Y, et al.: **CNC Machine Tool Fault Diagnosis Integrated Rescheduling Approach Supported by Digital Twin-Driven Interaction and Cooperation Framework.** *IEEE Access.* 2021; **9**: 118801–118814.
[Publisher Full Text](#)
146. Villalonga A, Negri E, Biscardo G, et al.: **A decision-making framework for dynamic scheduling of cyber-physical production systems based on digital twins.** *Annu Rev Control.* 2021; **51**: 357–373.
[Publisher Full Text](#)
147. Züst S, Züst R, Züst V, et al.: **A graph based Monte Carlo simulation supporting a digital twin for the curatorial management of excavation and demolition material flows.** *J Clean Prod.* 2021; **310**: 127453.
[Publisher Full Text](#)
148. Guo K, Wan X, Liu L, et al.: **Fault diagnosis of intelligent production line based on digital twin and improved random forest.** *Appl Sci.* 2021; **11**(16): 7733.
[Publisher Full Text](#)
149. Guerra-Zubiaga D, Kuts V, Mahmood K, et al.: **An approach to develop a digital twin for industry 4.0 systems: manufacturing automation case studies.** *Int J Comput Integr Manuf.* 2021; **34**(9): 933–949.
[Publisher Full Text](#)
150. Martinez EM, Ponce P, Macias I, et al.: **Automation pyramid as constructor for a complete digital twin, case study: A didactic manufacturing system.** *Sensors (Basel).* 2021; **21**(14): 4656.
[PubMed Abstract](#) | [Publisher Full Text](#) | [Free Full Text](#)
151. Lee D, Lee S: **Digital twin for supply chain coordination in modular construction.** *Appl Sci.* 2021; **11**(13): 5909.
[Publisher Full Text](#)
152. Vogel-Heuser B, Ocker F, Scheuer T: **A Concept for Using Digital Twins in Agent-based Production Systems.** *Automatisierungstechnik.* 2021; **69**(12): 1026–1039.
153. Rauscher F, Fischer G, Lehmann T, et al.: **A digital twin concept for the development of a DEMO maintenance logistics modelling tool.** *Fusion Eng Des.* 2021; **168**: 112399.
[Publisher Full Text](#)
154. Lai X, Wang S, Guo Z, et al.: **Designing a shape-performance integrated digital twin based on multiple models and dynamic data: A boom crane example.** *J Mech Des.* 2021; **143**(7): 071703.
[Publisher Full Text](#)
155. Heo TW, Khairallah SA, Shi R, et al.: **A mesoscopic digital twin that bridges length and time scales for control of additively manufactured metal microstructures.** *J Phys Mater.* 2021; **4**(3): 034012.
[Publisher Full Text](#)
156. Liu Y, Sun Y, Yang A, et al.: **Digital Twin-Based Ecogreen Building Design.** *Complexity.* 2021; **2021**: 1391184.
[Publisher Full Text](#)
157. Jiang F, Ding Y, Song Y, et al.: **Digital Twin-driven framework for fatigue life prediction of steel bridges using a probabilistic multiscale model: Application to segmental orthotropic steel deck specimen.** *Eng Struct.* 2021; **241**: 112461.
[Publisher Full Text](#)
158. Cai H, Zhu J, Zhang W: **Quality deviation control for aircraft using digital twin.** *J Comput Inf Sci Eng.* 2021; **21**(3): 031008.
[Publisher Full Text](#)
159. Guo J, Yang Z, Chen C, et al.: **Real-time prediction of remaining useful life and preventive maintenance strategy based on digital twin.** *J Comput Inf Sci Eng.* 2021; **21**(3): 031003.
[Publisher Full Text](#)
160. Jung WK, Park YC, Lee JW, et al.: **Simulation-based hybrid optimization method for the digital twin of garment production lines.** *J Comput Inf Sci Eng.* 2021; **21**(3): 031007.
[Publisher Full Text](#)
161. Yan D, Liu Q, Leng J, et al.: **Digital twin-driven rapid customized design of board-type furniture production line.** *J Comput Inf Sci Eng.* 2021; **21**(3): 031011.
[Publisher Full Text](#)
162. Deebak BD, Al-Turjman F: **Digital-twin assisted: Fault diagnosis using deep transfer learning for machining tool condition.** *Int J Intell Syst.* 2022; **37**(12): 10289–10316.
[Publisher Full Text](#)
163. Yi L, Glatt M, Ehmsen S, et al.: **Process monitoring of economic and environmental performance of a material extrusion printer using an augmented reality-based digital twin.** *Addit Manuf.* 2021; **48**: 102388.
[Publisher Full Text](#)
164. Wu C, Chen T, Li Z, et al.: **A function-oriented optimising approach for smart product service systems at the conceptual design stage: A perspective from the digital twin framework.** *J Clean Prod.* 2021; **297**: 126597.
[Publisher Full Text](#)
165. Dong Q, He B, Qi Q, et al.: **Real-time prediction method of fatigue life of bridge crane structure based on digital twin.** *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* 2021; **44**(9): 2280–2306.
[Publisher Full Text](#)
166. Zambrano V, Brase M, Hernández-Gascón B, et al.: **A digital twin for friction prediction in dynamic rubber applications with surface textures.** *Lubricants.* 2021; **9**(5): 57.
[Publisher Full Text](#)
167. Schmidt A, Helgers M, Vetter FL, et al.: **Digital twin of mRNA-based SARS-COV-2 vaccine manufacturing towards autonomous operation for improvements in speed, scale, robustness, flexibility and real-time release testing.** *Processes.* 2021; **9**(5): 748.
[Publisher Full Text](#)
168. Gou N, Cheng K, Huo D: **Multiscale modelling and analysis for design and development of a high-precision aerostatic bearing slideway and its digital twin.** *Machines.* 2021; **9**(5): 85.
[Publisher Full Text](#)
169. Klingaa CG, Mohanty S, Funch CV, et al.: **Towards a digital twin of laser powder bed fusion with a focus on gas flow variables.** *J Manuf Process.* 2021; **65**: 312–327.
[Publisher Full Text](#)
170. Alizadehsalehi S, Yitmen I: **Digital twin-based progress monitoring management model through reality capture to extended reality technologies (DRX).** *Smart Sustain Built Environ.* 2021; **12**(1): 200–236.
[Publisher Full Text](#)
171. Yu H, Han S, Yang D, et al.: **Job Shop Scheduling Based on Digital Twin Technology: A Survey and an Intelligent Platform.** *Complexity.* 2021; **2021**: 8823273.
[Publisher Full Text](#)
172. Zhang A, Meina X, Lin K, et al.: **Digital twin in computational design and robotic construction of wooden architecture.** *Adv Civ Eng.* 2021; **2021**: 8898997.
[Publisher Full Text](#)
173. Pei FQ, Tong YF, Yuan MH, et al.: **The digital twin of the quality monitoring and control in the series solar cell production line.** *J Manuf Syst.* 2021; **59**: 127–137.
[Publisher Full Text](#)
174. Magnanini MC, Melnychuk O, Yemane A, et al.: **A digital twin-based approach for multi-objective optimization of short-term production planning.** *IFAC-PapersOnLine.* 2021; **54**(1): 140–145.
[Publisher Full Text](#)
175. Wang G, Zhang G, Guo X, et al.: **Digital twin-driven service model and optimal allocation of manufacturing resources in shared manufacturing.** *J Manuf Syst.* 2021; **59**: 165–179.
[Publisher Full Text](#)
176. Zhu Z, Xi X, Xu X, et al.: **Digital Twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing.** *J Manuf Syst.* 2021; **59**: 453–466.
[Publisher Full Text](#)
177. Gopalakrishnan S, Hartman NW, Sangid MD: **Integrating Materials Model-Based Definitions into Design, Manufacturing, and Sustainment: A Digital Twin Demonstration of Incorporating Residual Stresses in the Lifecycle Analysis of a Turbine Disk.** *J Comput Inf Sci Eng.* 2021; **21**(2): 021006.
[Publisher Full Text](#)
178. Wang H, Li H, Wen X, et al.: **Unified modeling for digital twin of a**

- knowledge-based system design. *Robot Comput Integr Manuf.* 2021; **68**: 102074. [Publisher Full Text](#)
179. Zhuang C, Miao T, Liu J, et al.: **The connotation of digital twin, and the construction and application method of shop-floor digital twin.** *Robot Comput Integr Manuf.* 2021; **68**: 102075. [Publisher Full Text](#)
 180. Koulouris A, Misailidis N, Petrides D: **Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products.** *Food Bioprod Process.* 2021; **126**: 317–333. [Publisher Full Text](#)
 181. Wu Q, Mao Y, Chen J, et al.: **Application research of digital twin-driven ship intelligent manufacturing system: Pipe machining production line.** *J Mar Sci Eng.* 2021; **9**(3): 338. [Publisher Full Text](#)
 182. Vachálek J, Šišmišová D, Vašek P, et al.: **Design and implementation of universal cyber-physical model for testing logistic control algorithms of production line's digital twin by using color sensor.** *Sensors.* 2021; **21**(5): 1842. [Publisher Full Text](#)
 183. Hasan SM, Lee K, Moon D, et al.: **Augmented reality and digital twin system for interaction with construction machinery.** *J Asian Archit Build Eng.* 2022; **21**(2): 564–574. [Publisher Full Text](#)
 184. Liu J, Zhao P, Jing X, et al.: **Dynamic design method of digital twin process model driven by knowledge-evolution machining features.** *Int J Prod Res.* 2022; **60**(7): 2312–2330. [Publisher Full Text](#)
 185. Morabito L, Ippolito M, Pastore E, et al.: **A discrete event simulation based approach for digital twin implementation.** *IFAC-PapersOnLine.* 2021; **54**(1): 414–419. [Publisher Full Text](#)
 186. Hu S, Wang S, Su N, et al.: **Digital twin based reference architecture for petrochemical monitoring and fault diagnosis.** *Oil Gas Sci Technol.* 2021; **76**: 8. [Publisher Full Text](#)
 187. Wang Z, Feng W, Ye J, et al.: **A Study on Intelligent Manufacturing Industrial Internet for Injection Molding Industry Based on Digital Twin.** *Complexity.* 2021; **2021**: 8838914. [Publisher Full Text](#)
 188. Meraghni S, Terrisa LS, Yue M, et al.: **A data-driven digital-twin prognostics method for proton exchange membrane fuel cell remaining useful life prediction.** *Int J Hydrogen Energ.* 2021; **46**(2): 2555–2564. [Publisher Full Text](#)
 189. Mykoniatis K, Harris GA: **A digital twin emulator of a modular production system using a data-driven hybrid modeling and simulation approach.** *J Intell Manuf.* 2021; **32**(7): 1899–1911. [Publisher Full Text](#)
 190. Martinez S, Mariño A, Sanchez S, et al.: **A Digital Twin Demonstrator to enable flexible manufacturing with robotics: a process supervision case study.** *Prod Manuf Res.* 2021; **9**(1): 140–156. [Publisher Full Text](#)
 191. Todorov G, Zlatev B, Kamberov K: **Digital twin definition based on virtual prototype evolution of an UPS with kinetic battery accumulator.** *AIP Conf Proc.* 2021; **2333**(1): 110008. [Publisher Full Text](#)
 192. Mourtzis D, Angelopoulos J, Panopoulos N: **Equipment Design Optimization Based on Digital Twin under the Framework of Zero-Defect Manufacturing.** *Procedia Comput Sci.* 2021; **180**: 525–533. [Publisher Full Text](#)
 193. Wang P, Luo M: **A digital twin-based big data virtual and real fusion learning reference framework supported by industrial internet towards smart manufacturing.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part A): 16–32. [Publisher Full Text](#)
 194. Aversano G, Ferrarotti M, Parente A: **Digital twin of a combustion furnace operating in flameless conditions: Reduced-order model development from CFD simulations.** *Proc Combust Inst.* 2021; **38**(4): 5373–5381. [Publisher Full Text](#)
 195. Jiang H, Qin S, Fu J, et al.: **How to model and implement connections between physical and virtual models for digital twin application.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 36–51. [Publisher Full Text](#)
 196. Ragazzini L, Negri E, Macchi M: **A digital twin-based predictive strategy for workload control.** *IFAC-PapersOnLine.* 2021; **54**(1): 743–748. [Publisher Full Text](#)
 197. Glatt M, Sinnwell C, Yi L, et al.: **Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 231–245. [Publisher Full Text](#)
 198. Pan YH, Qu T, Wu NQ, et al.: **Digital Twin Based Real-time Production Logistics Synchronization System in a Multi-level Computing Architecture.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 246–260. [Publisher Full Text](#)
 199. Wang X, Wang Y, Tao F, et al.: **New Paradigm of Data-Driven Smart Customisation through Digital Twin.** *J Manuf Syst.* 2020; **58**(Part B): 270–280. [Publisher Full Text](#)
 200. Liu Q, Leng J, Yan D, et al.: **Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 52–64. [Publisher Full Text](#)
 201. Guo H, Chen M, Mohamed K, et al.: **A digital twin-based flexible cellular manufacturing for optimization of air conditioner line.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 65–78. [Publisher Full Text](#)
 202. Yi Y, Yan Y, Liu X, et al.: **Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 94–107. [Publisher Full Text](#)
 203. Liu S, Bao J, Lu Y, et al.: **Digital twin modeling method based on biomimicry for machining aerospace components.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 180–195. [Publisher Full Text](#)
 204. Xie Y, Lian K, Liu Q, et al.: **Digital twin for cutting tool: Modeling, application and service strategy.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 305–312. [Publisher Full Text](#)
 205. Kong T, Hu T, Zhou T, et al.: **Data Construction Method for the Applications of Workshop Digital Twin System.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 323–328. [Publisher Full Text](#)
 206. Mi S, Feng Y, Zheng H, et al.: **Prediction maintenance integrated decision-making approach supported by digital twin-driven cooperative awareness and interconnection framework.** *J Manuf Syst.* 2021; **58**(Part B): 329–345. [Publisher Full Text](#)
 207. Pronost G: **Repository: Digital twins along the product lifecycle : a systematic literature review of applications in manufacturing.** <http://www.doi.org/10.6084/m9.figshare.21941033>
 208. Fuller A, Fan Z, Day C, et al.: **Digital Twin:Enabling Technologies, Challenges and Open Research.** *IEEE Access.* 2020; **8**: 108952–108971. [Publisher Full Text](#)
 209. Rasheed A, San O, Kvamsdal T: **Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective.** *IEEE Access.* 2020; **8**: 21980–22012. [Publisher Full Text](#)
 210. Wu Y, Zhou L, Zheng P, et al.: **A digital twin-based multidisciplinary collaborative design approach for complex engineering product development.** *Adv Eng Informatics.* 2022; **52**: 101635. [Publisher Full Text](#)
 211. Kristoffersen E, Blomsma F, Mikalef P, et al.: **The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies.** *J Bus Res.* 2020; **120**: 241–261. [Publisher Full Text](#)
 212. Barricelli BR, Casiraghi E, Fogli D: **A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications.** *IEEE Access.* 2019; **7**: 167653–167671. [Publisher Full Text](#)
 213. Singh V, Willcoxy KE: **Engineering design with digital thread.** *AIAA/ASCE/AHS/ASC Struct Struct Dyn Mater Conf 2018.* 2018; 1–21. [Publisher Full Text](#)
 214. McFarlane D, Sarma S, Chirn JL, et al.: **Auto ID systems and intelligent manufacturing control.** *Eng Appl Artif Intell.* 2003; **16**(4): 365–376. [Publisher Full Text](#)
 215. Kwok PK, Yan M, Qu T, et al.: **User acceptance of virtual reality technology for practicing digital twin-based crisis management.** *Int J Comput Integr Manuf.* 2021; **34**(7–8): 874–887. [Publisher Full Text](#)
 216. Shengli W: **Is Human Digital Twin possible?** *Comput Methods Programs Biomed Updat.* 2021; **1**: 100014. [Publisher Full Text](#)
 217. Alcaraz C, Lopez J: **Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats.** *IEEE Commun Surv Tutor.* 2022; **24**(3): 1475–1503. [Publisher Full Text](#)
 218. Aheleroff S, Xu X, Zhong RY, et al.: **Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model.** *Adv Eng Inform.* 2021; **47**: 101225. [Publisher Full Text](#)
 219. Iung B, Morel D, Lhoste P: **Interoperable component-based emulation for validation of distributed control.** *IFAC Proc.* 2000; **33**(20): 159–165. [Publisher Full Text](#)