



HAL
open science

Intégration de fonctions électroniques imprimées sur des thermoplastiques 2D et 3D pour des applications radiofréquences

Camille Delfaut

► To cite this version:

Camille Delfaut. Intégration de fonctions électroniques imprimées sur des thermoplastiques 2D et 3D pour des applications radiofréquences. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALI036 . tel-03770216

HAL Id: tel-03770216

<https://theses.hal.science/tel-03770216>

Submitted on 6 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : MEP : Mécanique des fluides, Energétique, Procédés

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Camille DELFAUT

Thèse dirigée par **Nadège REVERDY-BRUAS**, Maître de conférences, Université Grenoble Alpes
et co-encadrée par **Tan-Phu VUONG**, Professeur, Grenoble INP
et **Denis CURTIL**

Préparée au sein du **Laboratoire Génie des Procédés Papetiers (LGP2)**

Et du **Laboratoire IMEP-LaHC**
dans **l'École Doctorale I-MEP2 – Ingénierie-Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production**

Intégration de fonctions électroniques imprimées sur des thermoplastiques 2D et 3D pour des applications radiofréquences

Thèse soutenue publiquement le **6 avril 2022**,
devant le jury composé de :

Madame Nadège REVERDY-BRUAS

MAITRE DE CONFERENCE, Université Grenoble Alpes, Directrice de thèse

Monsieur Naceur BELGACEM

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes,
Président

Monsieur Fabien FERRERO

PROFESSEUR, Université Côte d'Azur, Rapporteur

Monsieur Henri HAPPY

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université de Lille, Rapporteur

Monsieur Philippe PASSERAUB

PROFESSEUR ASSOCIE, Université de Genève-HEPIA, Examineur

Monsieur Mohamed SAADAoui

CHARGE DE RECHERCHE, Ecole des Mines de Saint-Etienne,
Examineur

Monsieur Tan-Phu VUONG

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes, co-directeur de thèse



Remerciements

Cette thèse a été réalisée d'octobre 2018 à avril 2022 à Grenoble dans le cadre de la Chaire MINT. Je tiens à remercier les directeurs de laboratoires du LGP2 et de l'IMEP-LaHC qui m'ont accueilli dans leur équipe et m'ont permis de mettre en œuvre le matériel nécessaire au bon déroulement de cette thèse :

- M. Jean-Emmanuel Broquin et Mme Anne Kaminski à l'IMEP-LaHC
- M. Didier Chaussy et Mme Anne Blayo au LGP2

Mes remerciements vont ensuite à l'équipe encadrante, Mme Nadège Reverdy-Bruas, M. Denis Curtil et M. Tan-Phu Vuong pour leur accompagnement technique et humain tout au long de cette thèse.

Je remercie également Mme Cécile Venet et M. Alejandro Niembro de Schneider Electric pour leur contribution à cette thèse.

Je remercie également la Fondation Grenoble INP pour leur accompagnement : M. Bernard Ugnon-Coussioz et Mme Murielle Brachotte

Je remercie les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail : M. Naceur Belgacem, M. Fabien Ferrero, M. Henri Happy, M. Philippe Passeraub, M. Mohamed Saadaoui, M. Manuel Fendler et Mme Cécile Venet.

Ce travail étant exploratoire, je tiens à remercier particulièrement les personnes qui m'ont aidées sur le terrain :

- M. Nicolas Corrao pour son savoir technique, sa patience et sa capacité à s'adapter à des dispositifs nouveaux
- M. Thierry Lacrevez pour son savoir-faire, sa connaissance théorique, sa bienveillance et sa gentillesse. Je le remercie pour son appui qui fut déterminant pour la progression de ces travaux
- M. Stéphane Giraud pour ses compétences techniques, sa capacité à trouver des solutions et ses qualités humaines que j'ai appréciées dans les moments de réussite et dans les périodes de doute
- M. Damien Paulet qui m'a beaucoup appris de la robotique et qui m'a épaulé pour les impressions parfois compliquées
- M. Quoc-Bao Duong pour m'avoir accueilli sur la plateforme Smart, pour avoir partagé son savoir-faire dans de nombreuses situations

Merci également aux différents laboratoires de Schneider Electric sur le site de Tec38 qui m'ont permis de faire des expérimentations. Merci à Suzie et à Adrien pour leur savoir faire et leur accompagnement pour la réalisation d'études.

Je souhaiterais également remercier mes collègues que j'ai côtoyés durant cette thèse :

- Merci à l'équipe RFM pour votre bienveillance, vos connaissances approfondies en radiofréquence et également les événements conviviaux. Merci en particulier à M. Pascal Xavier qui m'a soutenu tout au long de ces 3 ans.
- Merci à tous les doctorants que j'ai côtoyés à l'IMEP LaHC et au LGP2. Je souhaiterais remercier particulièrement mon collègue et ami M. Maxime Wawrzyniak pour ces années de partage et de rigolade dans les moments difficiles comme dans les moments de réussite.
- Merci également à tous les permanents des deux laboratoires, en particulier (je m'excuse par avance des oublis que je pourrais faire) M. Quentin Rafhay, M. Grégory Grosa, Mme Aude Bouchard, Mme Elise Ghibaud, Mme Anne Kaminski et M. Jean Emmanuel Broquin pour ces agréables discussions du midi au laboratoire.

Et enfin je souhaiterais remercier chaleureusement mes ami·es et ma famille pour leur soutien sans faille durant ces trois ans, ils et elles ont su être présent·es et me changer les idées quand c'était nécessaire. Je souhaiterais remercier mes parents, mon frère, mes grand-parents et ma tante pour tout leur soutien, leurs conseils et leur amour. Je ne pourrai jamais assez remercier mon compagnon, Baptiste, pour sa patience, ses encouragements et son soutien sans faille.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	5
I.1. METHODES PLASTRONIQUES.....	6
I.2. DE L'ELECTRONIQUE TRADITIONNELLE A LA PLASTRONIQUE	6
I.3. INTERET POUR LA PLASTRONIQUE.....	7
I.4. CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS	8
CHAPITRE I: ETAT DE L'ART DE LA PLASTRONIQUE.....	13
I.1. LES TECHNOLOGIES PLASTRONIQUES.....	14
I.1.1. Structuration laser directe (LDS).....	14
I.1.2. Electronique moulée.....	16
I.1.3. Impression directe d'encre (IDE).....	17
I.1.4. Comparaison des technologies plastroniques.....	40
I.1.5. Classification des technologies plastroniques.....	42
I.2. ETAT DE L'ART DES DISPOSITIFS PLASTRONIQUES.....	44
I.2.1. Synthèse de notions théoriques pour l'analyse de dispositifs radiofréquences	44
I.2.2. Antennes en plastronique	45
I.2.3. Lignes de transmission en plastronique	47
I.2.4. Capteurs en plastroniques.....	50
I.2.5. Systèmes électroniques en plastronique	52
I.2.6. Perspectives d'applications pour la plastronique.....	53
I.3. CONCLUSION	54
CHAPITRE II: DEVELOPPEMENT DES METHODES D'IMPRESSION.....	57
II.1. PRINCIPE DE L'IMPRESSION PAR JETTING.....	58
II.1.1. Description de la tête d'impression jetting	58
II.1.2. Les paramètres temporels de la tête d'impression	59
II.1.3. Superpositions des gouttes	60
II.2. CARACTERISTIQUES DES SUBSTRATS.....	61
II.3. MISE EN ŒUVRE D'UNE ENCRE CONDUCTRICE.....	62
II.3.1. Caractéristiques de l'encre	62
II.3.2. Post-traitement de l'encre : le recuit	68
II.4. MONTAGE DU SYSTEME D'IMPRESSION SUR ROBOT.....	68
II.4.1. Système jetting sur robot 4 axes.....	68
II.4.2. Système jetting sur robot 6 axes.....	71
II.5. OPTIMISATION DU PROCEDE D'IMPRESSION	76
II.5.1. Optimisation des paramètres temporels de la tête d'impression.....	76
II.5.2. Stratégies dynamiques d'impression pour améliorer la qualité des pistes imprimés.....	98
II.6. CONCLUSION	104
CHAPITRE III: CARACTERISATION RADIOFREQUENCE DE DISPOSITIFS IMPRIMES EN JETTING ET EXEMPLES D'APPLICATIONS.....	107
III.1. LIGNES DE TRANSMISSION COPLANAIRES	108
III.1.1. Lignes de transmission coplanaires en radiofréquence	108
III.1.2. Modes de propagation dans les lignes coplanaires	110
III.1.3. Modélisation d'une ligne de transmission	111
III.2. MATERIELS ET METHODES DE MESURES RADIOFREQUENCES	113
III.2.1. Matériel de mesures radiofréquences.....	113

III.2.2. Méthode d'extraction des paramètres RLGC	118
III.3. CONCEPTION ET CARACTERISATION RADIOFREQUENCE DE LIGNES DE TRANSMISSION COPLANAIRES IMPRIMEES EN 2D	120
III.3.1. Conception des lignes de transmission coplanaires	120
III.3.2. Caractérisation des lignes de transmission coplanaires imprimées	128
III.4. CARACTERISATION DE LIGNES DE TRANSMISSION COPLANAIRE SUR PLAN INCLINE	141
III.4.1. Contexte de l'étude	141
III.4.2. Matériels et méthodes	141
III.4.3. Résultats des mesures et de la modélisation	142
III.5. CONCEPTION ET CARACTERISATION DE LIGNES COPLANAIRES EN 3D	143
III.5.1. Contexte	143
III.5.2. Réalisation du prototype en 3D	144
III.5.3. Caractérisation du prototype en 3D	148
III.6. EXEMPLES D'APPLICATIONS DU PROCEDE D'IMPRESSION	153
III.6.1. Applications radiofréquences sur surface plane : antenne LoRa	154
III.6.2. Applications radiofréquences sur surface complexe	158
III.7. CONCLUSION	164
CONCLUSION GENERALE	167
ANNEXES	173
ANNEXE A : METHODE GENERALE DE CARACTERISATION PAR LES ONDES : LES PARAMETRES S	173
ANNEXE B : DEFINITIONS ET CARACTERISTIQUES DES ANTENNES	175
ANNEXE C : EXEMPLES DE STRUCTURES DE LIGNES DE TRANSMISSION [144]	178
ANNEXE D : CONDITIONS DE LIMITES MAXIMALES ET MINIMALES DES PARAMETRES D'IMPRESSION DE LA TETE VERMES	179
ANNEXE E : METHODE DE MANGAN	180
ANNEXE F : METHODE LH	182
ANNEXE G : LIGNE A MINIMISATION DE PERTES	185
ANNEXE H : DETERMINATION DES INCERTITUDES SUR LE CALCUL DE LA CONDUCTIVITE DES LIGNES IMPRIMEES	186
ANNEXE I : PERSPECTIVES D'ADAPTATION DE LIGNES COPLANAIRES POUR LE PROCEDE JETTING	187
LISTE DES COMMUNICATIONS	189
GLOSSAIRE : ACRONYMES	190
RÉFÉRENCES	193

Introduction générale

I.1.	METHODES PLASTRONIQUES	6
I.2.	DE L'ELECTRONIQUE TRADITIONNELLE A LA PLASTRONIQUE	6
I.3.	INTERET POUR LA PLASTRONIQUE.....	7
I.4.	CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS	8

Les innovations technologiques actuelles conduisent à développer des objets de la vie courante intégrant de plus en plus de fonctionnalités. Ainsi, des objets ayant des fonctions plus ou moins simples peuvent devenir connectés si on leur ajoute des fonctions électroniques de communication : c'est le domaine de l'internet des objets (IoT) en particulier.

Pour ajouter des fonctionnalités à un objet afin de le rendre « intelligent », il est nécessaire de lui adjoindre des éléments tels que des antennes, des capteurs, des composants électroniques, une batterie, tout cela pour qu'il puisse collecter et envoyer les données vers l'utilisateur et les réseaux de données. L'ajout de ces éléments requiert de la place ce qui peut demander une modification de la conception de l'objet, une augmentation de son encombrement et de son poids.

Les objets sont souvent intégrés dans des boîtiers plastique de protection possédant des surfaces plastiques sur lesquelles il est possible de placer des fonctions électroniques sans utiliser de Printed Circuit Board (PCB : éléments traditionnels en électronique). La technologie plastronique propose et permet alors, d'intégrer tout ou une partie de ces fonctions électroniques sur les surfaces plastiques disponibles.

I.1. Méthodes plastroniques

La plastronique, appelée *3D-MID* ou *3D Molded interconnect devices* en anglais, est un domaine mêlant la plasturgie et l'électronique : il s'agit d'intégrer de l'électronique à des pièces plastiques afin de leur apporter des fonctionnalités supplémentaires, de les alléger et de réduire les étapes d'assemblages.

Les procédés plastroniques permettent de déposer du métal sur des surfaces plastiques 2D ou 3D. Les composants électroniques peuvent être reportés puis collés ou imprimés. Trois procédés majeurs permettent de réaliser des produits plastroniques :

- Structuration laser directe (*Laser Direct Structuring* ou LDS) : un plastique dédié et dopé avec du cuivre doit être utilisé pour cette technique. Les zones à métalliser sont balayées par le laser puis la pièce est trempée dans un bain métallisant afin de faire croître les particules de cuivre sur cette zone [1].
- L'électronique moulée (*molded electronic*) : la fonction électronique est imprimée en 2D sur un support souple qui est ensuite moulé en 3D [2].
- Impression directe d'encre (*Ink based Direct Writing*) ou IDE : une encre conductrice est déposée sur un substrat plastique puis un recuit est opéré [3]. Il existe plusieurs techniques d'IDE dont les principales sont : le jet d'encre (*inkjet*), le jetting, l'aérosoljet et la micro-dépose.

I.2. De l'électronique traditionnelle à la plastronique

L'électronique est un secteur d'innovation important avec l'essor des objets connectés dans des domaines tels que l'automobile, l'aéronautique, la santé ou la domotique. Cette électronique met généralement en œuvre des PCB (*Printed Circuit Board*). Un PCB est constitué d'un assemblage de plusieurs couches de cuivre séparées par un isolant. Les couches de cuivre sont gravées afin d'obtenir des pistes qui relient les composants soudés à la surface.

Il est possible de réaliser des connexions, appelés vias, entre les couches de cuivre. Ce procédé est maîtrisé, peu coûteux et répétable. Il présente une définition compatible avec les composants de montage en surface actuels dont les plus petites tailles sont de 0,25 mm x 0,125 mm.

La plastronique permet d'intégrer l'électronique directement sur la surface ou dans les pièces plastiques, permettant ainsi un gain de place et de poids, la diminution du nombre de connexions et d'assemblages sur les lignes de production ainsi qu'une forte flexibilité pour la conception des objets. De plus, les technologies plastroniques sont des technologies additives et limitent la génération de déchets lors de la production de dispositifs en utilisant uniquement la matière nécessaire, contrairement aux technologies soustractives classiquement utilisées.

La Figure 0-1 présente quelques exemples d'objets réalisés en technologies plastroniques. L'encapsulation décrit l'action de mêler l'électronique et le substrat afin d'intégrer complètement la carte électronique à celui-ci. L'encapsulation ci-dessous présentée en a) peut être mise en œuvre avec les différentes technologies plastroniques.

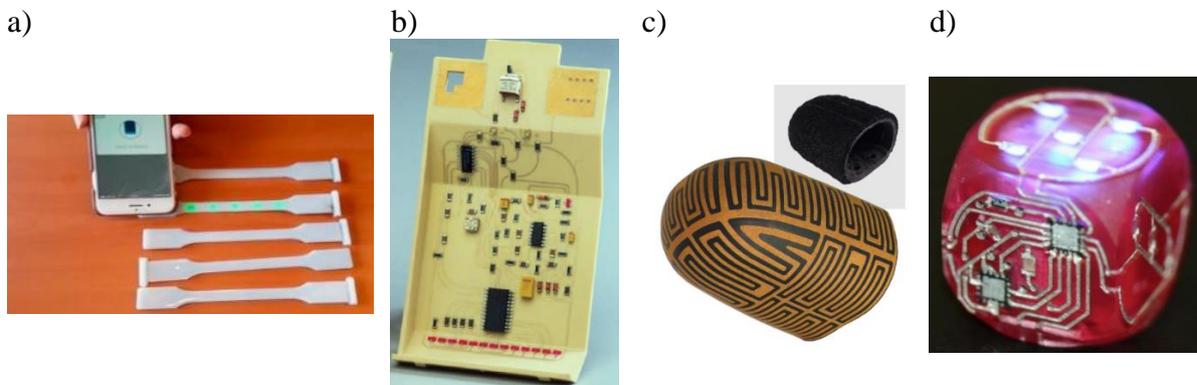


Figure 0-1 : a) Capteur de déformation encapsulé en électronique moulée [4] b) Circuit sur surface 3D réalisé en LDS [1] c) Capteur de toucher capacitif en LDS [5] d) Dé contenant un accéléromètre, une batterie et un processeur réalisé en IDE [6]

I.3. Intérêt pour la plastronique

Le marché de la plastronique connaît une croissance mondiale annuelle depuis 2019 de 12 à 22% et celle-ci sera de 10,5% pour l'Europe à l'horizon 2024, d'après le rapport [7]. Une valeur totale de 5 milliards d'euros pour le marché de la plastronique devrait être atteinte en 2026.

Les technologies plastroniques ont commencé à se développer dans les années 2000 puis ont connu une croissance importante à partir de 2005. Sur la Figure 0-2a), l'évolution des brevets de 1997 à 2015 est représentée. Le fort accroissement du nombre de brevets témoigne de l'intérêt des industriels pour ces technologies. Sur la Figure 0-2b), la répartition des brevets en fonction des entreprises inventrices est représentée. La majeure partie des brevets appartient à l'entreprise Bosch (31%) mais aussi à Osram 12%, Siemens (10%) et Tyco electronic (9%). Les domaines d'activités adressés par les technologies plastroniques sont vastes tels que l'énergie, la santé, l'industrie, l'automobile ou le bâtiment.

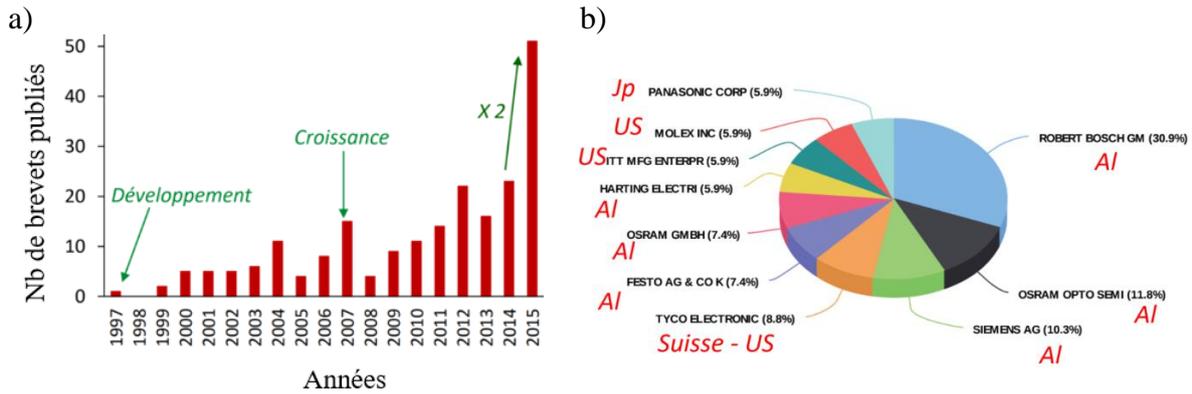


Figure 0-2 : a) Evolution du nombre de brevet déposés pour des technologies plastroniques entre 1997 et 2015 (AcclaimIP.com) b) Répartition des brevets par entreprise entre 1997 et 2015 (AcclaimIP.com)

La Figure 0-3 montre le nombre de publications réalisées sur les technologies plastroniques de 2000 à 2021. Elle montre une augmentation globale du nombre de publications principalement causé par l’augmentation du nombre de publication de l’électronique moulée qui est une technologie maîtrisée et peu couteuse pour des grandes séries. Il existe peu de bibliographie concernant la technologie LDS, cela peut s’expliquer par le dépôt important de brevets sur cette technologie dans la même période. De plus, la technologie LDS peut être moins facile d’accès pour les laboratoires académiques que pour les industriels. Les technologies d’impression directe d’encre sont en rupture de ces deux technologies, le procédé n’a pas encore atteint la validation industrielle et est encore en développement.

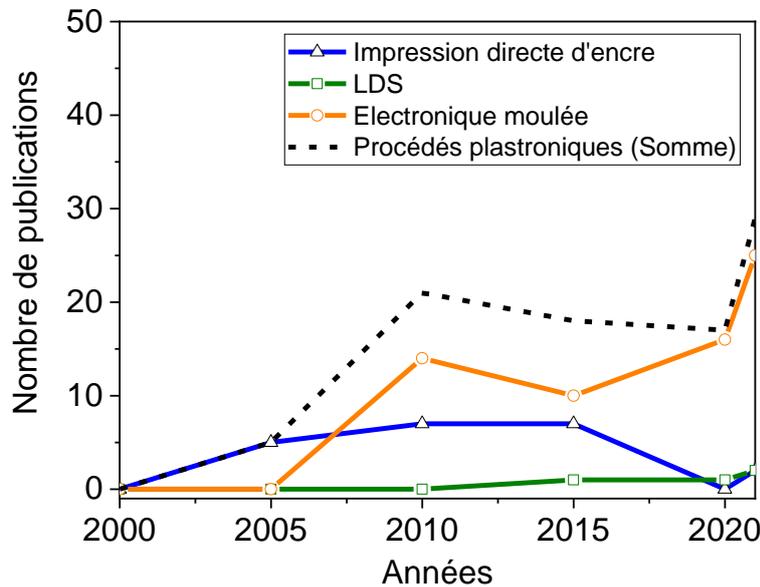


Figure 0-3 : Nombre de publications pour chaque technologie plastronique dans la base IEEE entre 2000 et 2021. Mots clefs : pour l’impression directe d’encre, « inkjet substrate plastic », « microdispensing substrate plastic », « jetting substrate plastic » et « aerosol jet substrate plastic » ; pour LDS « Laser direct structuring plastic substrate », pour l’électronique moulée « in mold electronic 3D », et pour les procédés plastroniques, la somme du nombre d’article pour chaque année est calculée.

I.4. Cadre de l’étude et objectifs

La Chaire MINT (Innovating for molded & printed electronics) est une Chaire d’Excellence scientifique soutenue par la Fondation Partenariale Grenoble INP et ayant pour mécène Schneider Electric. Elle a été créée en septembre 2015 pour une durée de 5 ans et une

prolongation d'un an a été effectuée. Au travers de la Chaire MINT, Schneider Electric s'engage avec deux laboratoires de recherche, le LGP2 et l'IMEP-LaHC dans le but d'intégrer des fonctionnalités électroniques sur des thermoplastiques de forme 3D. Pour cela, les différents acteurs (Figure 0-4) apportent leurs compétences sur des domaines d'expertises variés :

- LGP2 – UMR 5518 : Laboratoire dont une équipe développe une expertise sur la fonctionnalisation de surface par procédés d'impression, spécialiste de l'électronique imprimée sur substrats flexibles et rigides.
- IMEP-LaHC – UMR 5130 : Laboratoire spécialiste de la conception et caractérisation de dispositifs électroniques avancés
- S.smart-DS : Plateforme technologique de mutualisation de technologies industrielles mettant à disposition des ressources techniques et d'expertise ; spécialiste de la fabrication additive, de l'automatique et de la robotique
- Schneider Electric : Entreprise internationale spécialiste mondial du management de l'énergie
- Fondation Grenoble INP : Soutient la Chaire MINT



Figure 0-4 : Les acteurs de la chaire MINT

Dans le cadre de la Chaire, un cahier des charges est défini : concevoir des objets avec des fonctionnalités sans fils, sur des gammes de fréquences diverses en développant un procédé industrialisable à moyen terme. Pour cela, des matériaux qualifiés et des produits commercialisés sont utilisés. Pour réaliser cela, les technologies IDE ont été ciblées, plus particulièrement la micro-dépose et le jetting.

Une frise présentée en Figure 0-5 montre la chronologie des différents intervenants du projet. Les premiers travaux de recherche ont débuté en 2016 dans le cadre d'un post-doctorat. La compatibilité entre l'encre et le substrat thermoplastique a été étudiée. L'adhésion de l'encre sur le thermoplastique a été testée et des travaux d'optimisation du recuit ont été menés. Dans le cadre de ce travail, le recuit ohmique a montré tout son potentiel sur le recuit de lignes en permettant d'obtenir des performances équivalentes (voire meilleures) par rapport à un recuit en étuve [8]. Cela permet un gain de temps appréciable dans un procédé industriel, cependant tous les motifs imprimés ne peuvent pas être recuits de cette façon.

Un stage de PFE a ensuite permis de tester l'impression sur des substrats inclinés. Lors de cette étude, une technologie de micro-dépose à vis sans fin (Ecopen) a été mise en œuvre. L'étude a confirmé ce qui était pressenti : une impression avec un système de dépose perpendiculaire à la surface d'impression donne de meilleurs résultats. En outre, plus la surface à imprimer est inclinée, moins le résultat est satisfaisant.

La présente thèse a débuté en octobre 2018 en utilisant la technique d'impression de jetting (Verme) qui permet un contrôle plus fin de la quantité d'encre déposée. Durant cette

thèse, 3 stages ont été réalisés (IUT et ingénieur). Un système d'impression en micro-dépose à valve pneumatique (Nordson) a également été testé lors du stage IUT afin d'étudier sa complémentarité avec le dispositif de jetting. En effet, cette technologie a été investiguée compte tenu de son encombrement moindre qui permettrait d'imprimer plus aisément dans de petits espaces. Une preuve de concept a été réalisée en imprimant une piste continue sur une pièce 3D le long d'une goulotte d'une trentaine de centimètres. Le stage ingénieur-ouvrier a permis de définir des stratégies d'impression avec la technologie de jetting et de produire des débuts et fins de pistes de qualité. Dans le cadre du stage PFE, un prototype basé sur les perspectives possibles de la plastronique a été simulé.

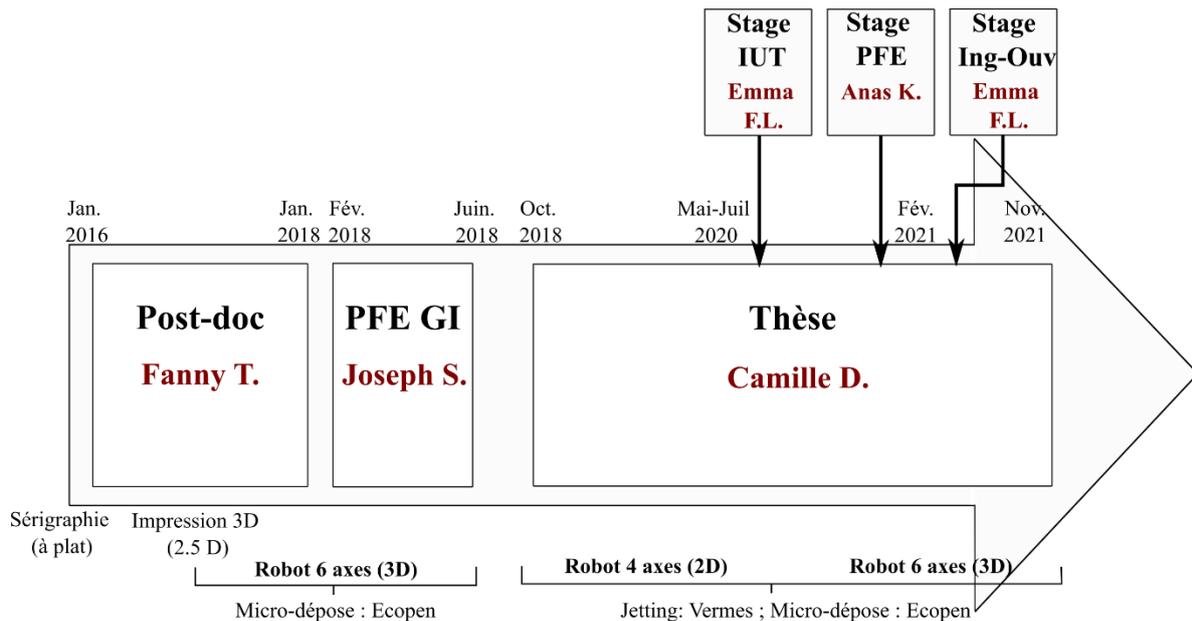


Figure 0-5 : Frise chronologique montrant l'articulation des différentes ressources au sein de la Chaire Mint

Dans un premier temps, cette thèse a pour objectif de mettre en œuvre, de caractériser et d'optimiser le procédé de jetting en 2D et en 3D.

Dans un deuxième temps, les performances de ce procédé en radiofréquence sont évaluées afin de définir les limites de la technologie et de pouvoir initier une modélisation de dispositifs plastroniques.

Enfin, des applications radiofréquences sont proposées afin de montrer la faisabilité de prototypes opérationnels.

Pour atteindre l'ensemble de ces objectifs, le manuscrit est divisé en 3 chapitres :

- Dans un premier chapitre, une étude bibliographique sur les procédés plastroniques et leurs applications actuelles est présentée afin de dresser un état de l'art du domaine plastronique. Les technologies plastroniques sont détaillées et un positionnement de la technologie mise en œuvre dans le présent travail par rapport aux technologies existantes est proposé. Des dispositifs réalisés en technologie plastronique sont présentés pour chacun des domaines abordés.

- Le second chapitre décrit le développement du procédé de jetting choisi pour ce travail en 2D et en 3D, ainsi que la caractérisation géométrique et électrique des motifs imprimés. Les paramètres d'impression sont étudiés et optimisés pour une impression robuste. Des stratégies d'optimisation de l'impression sont développées.
- Le troisième chapitre traite de la caractérisation de ligne de transmission en 2D et en 3D. Dans un premier temps, des lignes coplanaires en 2D sont simulées et imprimées. Une optimisation de l'impression est réalisée en imprimant des plans de masse maillés. Ensuite, des lignes coplanaires sont imprimées sur des substrats 3D comportant des angles à 90° et à 130° , puis mesurées. Des applications sont ensuite détaillées sur des substrats 2D et 3D.
- Enfin, le manuscrit conclut sur le caractère innovant du travail réalisé ainsi que sur les perspectives offertes par la technologie de jetting dans des domaines majeurs tels que l'automobile, la gestion de l'énergie ou la domotique.

Chapitre I: Etat de l'art de la plastronique

I.1.	LES TECHNOLOGIES PLASTRONIQUES.....	14
I.1.1.	Structuration laser directe (LDS).....	14
I.1.2.	Electronique moulée.....	16
I.1.3.	Impression directe d'encre (IDE).....	17
I.1.3.1.	Substrats pour l'impression directe d'encre.....	18
I.1.3.2.	Encres pour l'impression directe d'encre	19
I.1.3.3.	Méthodes de recuit des encres conductrices sur substrat plastique.....	21
I.1.3.4.	Micro-dépose.....	31
I.1.3.5.	Aérosoljet	33
I.1.3.6.	Jet d'encre	34
I.1.3.7.	Jetting.....	36
I.1.3.1.	Comparaison des technologies d'impression directe d'encre	37
I.1.3.2.	Robots pour dispositifs IDE	38
I.1.4.	Comparaison des technologies plastroniques.....	40
I.1.5.	Classification des technologies plastroniques.....	42
I.2.	ETAT DE L'ART DES DISPOSITIFS PLASTRONIQUES.....	44
I.2.1.	Synthèse de notions théoriques pour l'analyse de dispositifs radiofréquences.....	44
I.2.2.	Antennes en plastronique	45
I.2.2.1.	Performances d'antennes sur PCB	45
I.2.2.2.	Performances d'antennes plastroniques.....	46
I.2.3.	Lignes de transmission en plastronique	47
I.2.4.	Capteurs en plastroniques.....	50
I.2.5.	Systèmes électroniques en plastronique	52
I.2.6.	Perspectives d'applications pour la plastronique.....	53
I.3.	CONCLUSION	54

La plastronique regroupe plusieurs domaines d'activités. Elle se trouve à la convergence de la plasturgie et de l'électronique dans la mesure où elle consiste à intégrer des fonctions électroniques sur des substrats plastiques. Différentes technologies permettent de produire de tels objets. Ce chapitre a pour vocation de faire un état des lieux de ces technologies, en décrivant pour chacun d'entre elles, les atouts et les limites. Dans un second temps, des exemples d'objets plastroniques sont présentés et comparés.

I.1. Les technologies plastroniques

I.1.1. Structuration laser directe (LDS)

La technologie LDS a été développée en Allemagne à l'Université des Sciences Appliquées Ostwestfalen-Lippe en 1997, puis les brevets ont été transférés à l'entreprise allemande LPKF qui commercialise à présent cette technologie. Le substrat pour la technologie LDS contient du CuO et du Cr₂O₃. L'oxyde de métal est activé par un laser YAG infrarouge qui présente généralement les caractéristiques suivantes : une longueur d'onde de 10,6 μm, une puissance de 1 à 17 W, une fréquence maximale de 200 kHz et une vitesse d'avancement du laser à la surface du substrat allant jusqu'à 2200 mm/s [9]. L'activation par le laser réduit le CuO en Cu. Un traitement chimique par bain métallisant permet de faire croître les particules de cuivre. Afin d'éviter l'oxydation de la ligne, deux dépôts successifs de nickel et d'or peuvent être ajoutés. Ces étapes sont représentées sur la Figure I-1.

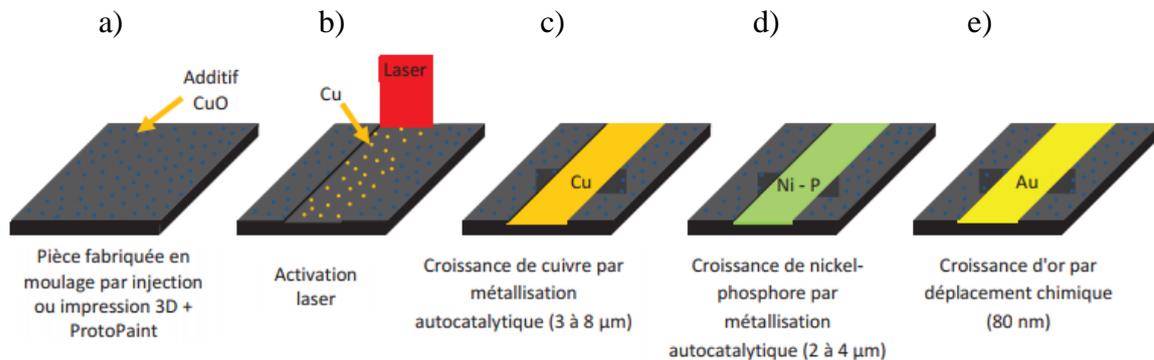


Figure I-1 : Les étapes du procédé LDS par [10]

Pour cette technologie la force d'adhésion des particules de cuivre au substrat est un réel enjeu. Elle est dépendante de la rugosité de surface après le passage du laser : plus la rugosité est importante plus la surface de contact est élevée et donc la force d'adhésion des particules métalliques est importante. Trois paramètres principaux conditionnent la rugosité : la puissance, la vitesse d'avancement et la fréquence du laser [11,12]. En effet, en activant la surface du substrat, le laser génère également de la chaleur ce qui forme une rainure et crée donc de la rugosité, comme montré sur la Figure I-2 [13,14]. Dans [9], les paramètres optimaux sont proposés pour obtenir une rugosité minimale. De façon générale [10] :

- Une augmentation de la puissance du laser entraîne une augmentation de la largeur de métallisation.
- Une augmentation de la vitesse entraîne une diminution de la largeur de métallisation.

- Une augmentation de la fréquence entraîne une diminution de la largeur de métallisation.

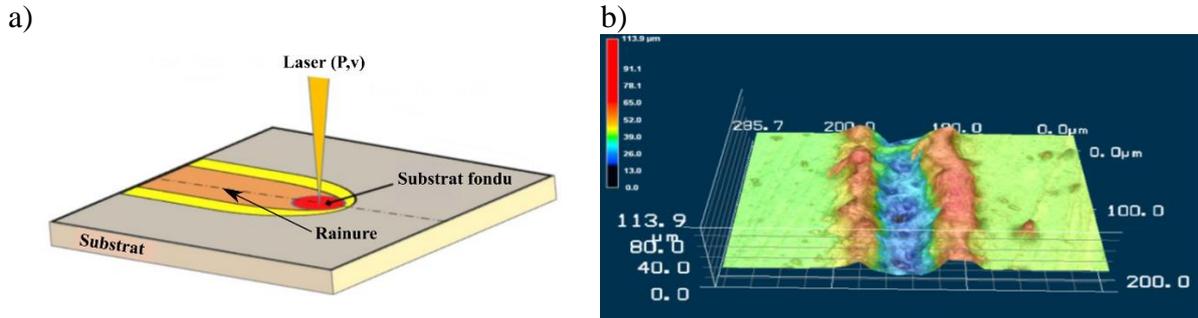


Figure I-2 : a) Schéma de l'activation du substrat par le passage du laser YAG par [11] b) Topologie du substrat après passage du laser pour une puissance de 5 W par [11]

Une conductivité de $35,7 \pm 19,4$ MS/m est rapportée dans la thèse [10] ce qui correspond à 30% de la conductivité du cuivre dans le cas le moins bon. L'épaisseur du cuivre varie entre 2 et $10 \mu\text{m}$ [10,15]. Dans [10] la rugosité du dépôt est comprise entre 2,2 et $3,9 \mu\text{m}$ selon le substrat utilisé et dans [9] la rugosité varie de 1 à $6 \mu\text{m}$ en faisant varier la vitesse, la fréquence et la puissance.

Sur la Figure I-3 et le Tableau 1 les résolutions maximales atteignables avec la technologie LDS sont synthétisées.

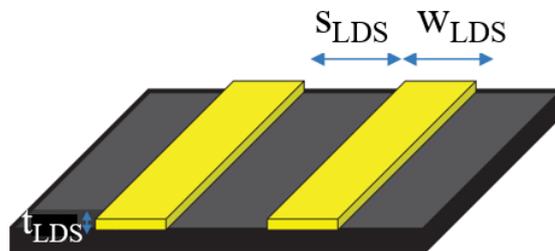


Figure I-3 : illustration des règles de dessin pour la technologie LDS

Un espace entre piste minimum de $150 \mu\text{m}$, une largeur de piste minimale de $150 \mu\text{m}$ et une épaisseur minimale de $3 \mu\text{m}$ sont mesurées.

Tableau 1 : Résolutions maximales atteignables

<i>Dimension</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
$S_{LDS} (\mu\text{m})$	150	-
$W_{LDS} (\mu\text{m})$	150	-
$t_{LDS} (\mu\text{m})$	3	15

Dans [10] deux difficultés sont mentionnées :

- Certains plastiques génèrent des particules qui sont activées au passage du laser et sont alors métallisées, ce qui crée des zones métallisées en dehors des pistes prévues.

- Le laser doit être précisément ajusté en puissance, vitesse et fréquence afin d'obtenir une couche de métal suffisante pour réaliser un dispositif performant. Les paramètres doivent être ajustés pour éviter un échauffement trop important de la piste tout en obtenant une bonne adhésion au substrat [11].

De manière générale, le LDS est limitant par la nécessité d'utiliser un substrat dopé en oxyde cuivre : il n'est pas possible d'ajouter une fonction sur un substrat standard quelconque.

I.1.2. Electronique moulée

L'électronique moulée permet de fonctionnaliser un substrat et c'est également un moyen d'encapsuler l'électronique afin de la protéger de son environnement (eau, abrasion, intempéries...).

Afin de réaliser des pièces en électronique moulée, les composants sont d'abord assemblés ou imprimés sur un film plastique. Un polymère est ensuite injecté sur le film fonctionnalisé le tout étant placé dans un moule comme présenté en Figure I-4a). Le plastique à injecter est chauffé à température de fusion (270°C pour le polyamide 6) puis injecté dans le moule à une pression maximum de 100 MPa, le moule étant lui-même chauffé de 65°C à 80°C [2,16]. Le moule est fermé, puis les temps de maintien et de refroidissement dépendant du matériau doivent être respectés afin d'éviter des déformations de la pièce. Une fois ces temps écoulés, la pièce peut être éjectée [16].

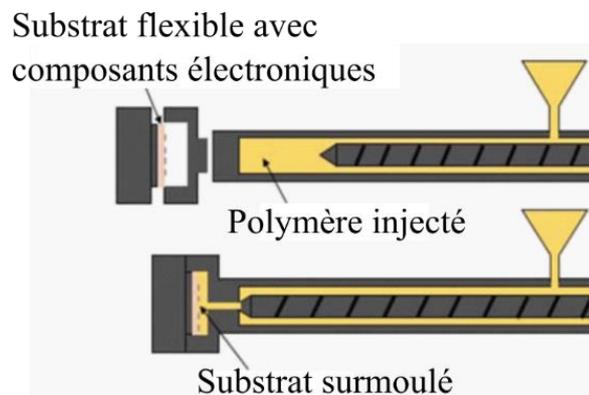


Figure I-4 : le procédé électronique moulée [16]

Il est également possible de réaliser des pièces avec des multicouches injectées [17]. Une pièce 3D d'électronique moulée pour l'automobile par exemple [2] peut présenter différentes couches comme présenté sur la Figure I-5 :

- La première couche de surface est décorative (1)
- La seconde couche (2) est imprimée au verso de la première avec des encres conductrices ou diélectriques par sérigraphie reliant des composants montés en surface (CMS), afin de réaliser une fonctionnalité (boutons, lumière...)
- Une couche de résine (3) est injectée entre les deux surfaces (la surface décorative et la surface finale).
- La surface finale (4) comporte également des impressions

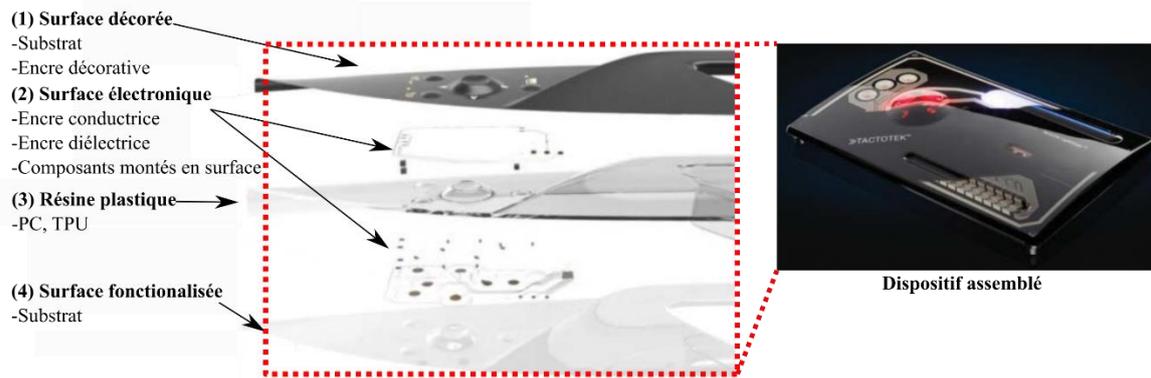


Figure I-5 : Exemple de pièce en électronique moulée pour l'automobile de [2]

L'électronique moulée permet la réalisation de pièces 3D plastroniques combinant les procédés maîtrisés du domaine industriel (injection plastique, thermoformage).

Les circuits électroniques peuvent être imprimés par différentes techniques, la résolution peut alors s'évaluer en fonction du procédé d'impression utilisé, dans le Tableau 2 ces résolutions sont données sont données à titre indicatif.

Dans [18] un boîtier est réalisée en électronique moulée. La sérigraphie et l'aérosoljet ont été envisagés, cependant seule la sérigraphie a été retenue pour sa simplicité d'utilisation et sa rapidité. La largeur de la piste est comprise entre 60 et 65 μm , l'épaisseur varie entre 8 et 12 μm . La résistivité des pistes est mesurée à 34,1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$.

Tableau 2 : Résolution de différentes techniques d'impression 2D [19]

<i>Technique d'impression</i>	<i>Résolution (μm)</i>	<i>Vitesse d'impression ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)</i>
<i>Flexographie</i>	30-75	50-500
<i>Gravure</i>	20-75	20-1000
<i>Offset</i>	20-50	15-1000
<i>Sérigraphie</i>	50-100	10-100
<i>Jet d'encre</i>	20-50	1-100

L'électronique surmoulée comporte de nombreuses étapes de fabrication pour chaque couche. Les composants électroniques montés en surface ainsi que les encres fonctionnelles doivent être résistants à la chaleur et à la pression ce qui peut être restrictif.

I.1.3. Impression directe d'encre (IDE)

L'impression directe d'encre est une technologie issue de l'électronique imprimée. Cette dernière désigne un ensemble de technique d'impression mises en œuvre pour fonctionnaliser des surfaces-à l'origine, souples- en mettant en œuvre des procédés d'impression. Leur atout majeur réside dans le caractère additif de la technologie : seule la matière utile est déposée contrairement à l'électronique conventionnelle qui est une méthode soustractive. En électronique imprimée, les composants électroniques peuvent être imprimés en combinant différents types d'encres (conductrice ou diélectrique par exemple) [20].

L'impression directe d'encre (IDE) fait partie de cet ensemble de techniques. Elle présente la particularité de pouvoir déposer de l'encre en programmant une trajectoire qui peut être unique et cela, sur un support 3D. Quatre principales technologies permettent de réaliser de l'IDE :

- Micro-dépose : cette technique consiste à déposer en continu de l'encre sur un substrat, généralement à l'aide d'une aiguille alimentée par un réservoir pressurisé.
- Aérosoljet : cette technique projette des microgouttelettes d'encre focalisée sur le substrat afin de former le motif imprimé
- Jet d'encre : le principe est d'éjecter, à une fréquence élevée, des gouttes d'encre sur le substrat afin de former des motifs imprimés.
- Jetting : le fonctionnement est similaire à la technique jet d'encre cependant elle permet l'utilisation d'encres dont la viscosité varie de faible à très visqueuse ; la taille des gouttes résultantes est plus élevée.

Les technologies jet d'encre, jetting, aérosoljet sont dites « à gouttes » car elles déposent l'encre sous forme de gouttes ; la micro-dépose est dite « à flux » car l'encre est déposée sous forme d'un cordon continu [21].

I.1.3.1. *Substrats pour l'impression directe d'encre*

Le plastique est le substrat utilisé pour la plastronique en lien avec les procédés d'impression listés précédemment. Cependant, ces procédés d'impression sont aussi utilisés sur d'autres substrats tels que le papier [22] ou la céramique [23]. Certaines caractéristiques des substrats sont importantes et sont à mettre en lien avec le procédé d'impression utilisé et la qualité finale d'impression obtenue.

I.1.3.1.a) La rugosité

La rugosité est une caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide. Elle peut être évaluée sur une ligne ou sur une surface, respectivement désignée par R ou S. Il existe différents indicateurs de l'état de surface (donnés ici pour une ligne, c'est-à-dire en une dimension) :

- R_a (μm) est la moyenne arithmétique des valeurs absolues du profil de rugosité centré sur 0
- R_t (μm) est la valeur crête à crête maximale sur la totalité du profil de rugosité
- R_z (μm) est la moyenne des cinq valeurs crête à crête maximales (R_t)

La Figure I-6 illustre un calcul de R_a et de R_t sur un profil.

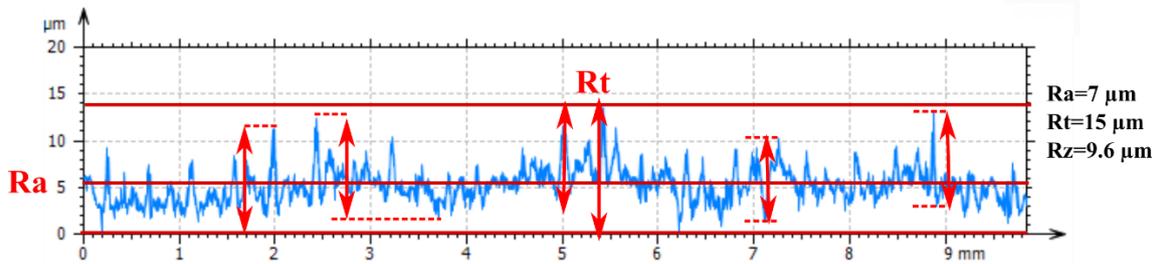


Figure I-6 : Exemple de Ra et de Rt sur un profil

La rugosité est une caractéristique importante pour l'IDE car si elle est trop élevée la qualité de l'impression peut diminuer, entraînant une chute de la conductivité [24].

I.1.3.1.b) Température de transition vitreuse

La résistance à la température est une caractéristique primordiale pour l'IDE car un recuit est nécessaire après dépose de l'encre, ce qui implique une élévation de température du substrat. Pour la plastronique, les substrats utilisés sont généralement des polymères thermoplastiques. Ils ne doivent pas être soumis à une température excédent leur température de transition vitreuse (T_g) afin de ne pas les endommager. Le Tableau 3 donne les T_g pour des plastiques couramment utilisés dans l'électronique imprimée. Le polyimide (PI) a une T_v élevée car il a été développé pour résister à de fortes températures mais présente un prix plus élevé que les autres substrats.

Tableau 3 : Températures de transition vitreuse de substrats plastiques

Substrat plastique	PET	PEN	PC	PI
T_g (°C) [25]	70	120	150	360
Coût (cent/dm ²) [26]	2	3,5	-	30

Le substrat utilisé dans ce travail est le PC+ABS, il sera présenté dans le chapitre suivant (II.2).

I.1.3.2. Encres pour l'impression directe d'encre

D'une manière générale, les encres peuvent être utilisées pour des applications graphiques (texte, décors) ou bien dans un but de fonctionnalisation.

Les encres peuvent se présenter sous la forme de liquide plus ou moins fluide, de pâte ou encore de poudre, selon leur composition. Elles sont formées de trois éléments principaux quel que soit leur domaine d'application [27] :

- L'élément colorant ou fonctionnel : pour une encre graphique cela correspond aux pigments et pour une encre fonctionnelle ces particules assurent la fonctionnalité : conduction électrique, permittivité forte...
- Le véhicule est composé de solvants et d'une résine polymère. Il permet d'obtenir une viscosité adaptée au procédé d'impression et une répartition uniforme des particules dans l'encre.

- Les additifs permettent d'ajuster des propriétés rhéologiques de l'encre ou une fonction supplémentaire après séchage, de protection par exemple.

L'encre doit répondre à plusieurs critères : elle doit être imprimable avec la technologie ciblée, elle doit pouvoir être séchée ou recuite et à la suite de ce procédé, elle doit présenter une bonne adhésion au substrat [27].

Pour la plastronique, les encres fonctionnelles sont principalement utilisées afin de fonctionnaliser les surfaces 3D. Les encres graphiques peuvent être utilisées occasionnellement pour apporter de l'esthétisme à certains produits (secteur de l'automobile par exemple).

Les encres fonctionnelles utilisées pour l'impression directe sont identifiées en 3 catégories :

- Encres semi-conductrices : celles-ci sont utilisées pour réaliser les couches actives des transistors, les diodes électroluminescentes organiques (OLED) ou les photovoltaïques organiques (OPV) par exemple [28–31].
- Encres diélectriques : elles sont utilisées pour leur importante permittivité dans les transistors ou les capacités [32]
- Encres conductrices : elles sont utilisées pour les systèmes électroniques. Les applications sont diverses telles que les antennes, les capteurs ou les connections électroniques

Il existe également des encres conductrices à base de polymère polyaniline et poly(3,4-éthylène-dioxythiophène) aussi appelé PEDOT. Celui-ci peut être dopé avec du poly(styrène sulfonique acide) pour pouvoir atteindre une résistivité de 1000 à 10 000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ [33–35].

Les encres à base de carbone ne contiennent pas de métal mais présentent une conductivité équivalente. Les encres à base de nanotubes de carbone (CNT) présentent des propriétés particulièrement intéressantes : elles sont conductrices (résistivité comprise entre 10 et 100 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ [36]) et robustes mécaniquement. La principale difficulté pour leur développement est l'agrégation de ces molécules en phase liquide [37].

Les encres métalliques conductrices utilisent généralement des particules d'argent, de cuivre ou d'or. Plusieurs critères sont discriminants pour choisir le métal : la conductivité, la stabilité et le coût. L'argent présente la conductivité la plus haute parmi ces trois métaux les plus utilisés dans le domaine de l'électronique (Tableau 4).

Tableau 4 : Propriété électrique des principaux métaux utilisé en impression fonctionnelle [26] et leur coût à la date de novembre 2021 (journaldunet.fr)

<i>Métal</i>	<i>Argent</i>	<i>Cuivre</i>	<i>Or</i>
<i>Conductivité à 20°C (S/m)</i>	6.29×10^7	5.95×10^7	4.52×10^7
<i>Coût (€/kg)</i>	800	8	54200

Le cuivre présente un coût moins important que l'or et l'argent (Tableau 4) cependant il s'oxyde rapidement à l'air [38]. Des études sont en cours afin d'encapsuler les particules de

cuivre pour éviter leur oxydation [39]. L'or présente un coût très important et est plutôt utilisé dans le domaine médical pour son inertie et ses propriétés relativement moins cytotoxique que le cuivre et l'argent [40]. L'argent est un compromis entre coût et stabilité physico-chimique car son oxydation a lieu seulement à haute température.

Les particules métalliques peuvent être de taille micrométrique ou nanométrique dans l'encre :

- Les microparticules (MP) ont une dimension caractéristique de 15 à 20 μm . Le dépôt est par conséquent plus épais et la rugosité est également plus élevée [26].
- Les nanoparticules (NP) ont un diamètre entre 5 et 80 nm. Ces dimensions donnent lieu à des propriétés physiques différentes des microparticules. En particulier, il a été établi que la température de fusion diminuait avec la taille des particules [41,42].

I.1.3.3. *Méthodes de recuit des encres conductrices sur substrat plastique*

Un post-traitement après impression est nécessaire afin de rendre la piste fonctionnelle et d'assurer son adhésion mécanique au substrat.

Il existe différents types de post-traitement selon les encres imprimées [41,43] :

- Le frittage permet la coalescence des particules pour former un seul solide. Ce procédé consiste à amener la piste imprimée à la température de fusion des particules de métal (plus de 300°C).
- Le recuit consiste à élever la température de la piste imprimée mais de manière moins importante que le frittage. Dans le cas d'impression sur des substrats sensibles à la chaleur cela permet d'éviter de les endommager en dépassant la température de transition vitreuse (T_g).
- La polymérisation est un procédé entraînant des modifications chimiques dans l'encre. Une polymérisation aux UV est généralement utilisée et nécessite la présence de photoamorceurs dans l'encre.

Le frittage est généralement utilisé pour les encres à nanoparticules car leur taille permet d'atteindre le point de fusion plus rapidement que des grosses particules [41,42].

Dans les paragraphes suivants, le recuit concernant les encres métalliques sur substrats plastiques sera détaillé. Les principaux substrats plastiques utilisés dans l'électronique imprimée sont répertoriés dans le La résistance à la température est une caractéristique primordiale pour l'IDE car un recuit est nécessaire après dépose de l'encre, ce qui implique une élévation de température du substrat. Pour la plastronique, les substrats utilisés sont généralement des polymères thermoplastiques. Ils ne doivent pas être soumis à une température excédent leur température de transition vitreuse (T_g) afin de ne pas les endommager. Le Tableau 3 donne les T_g pour des plastiques couramment utilisés dans l'électronique imprimée. Le

polyimide (PI) a une T_v élevée car il a été développé pour résister à de fortes températures mais présente un prix plus élevé que les autres substrats.

Tableau 3. Ceux-ci présentent des températures de transition vitreuse en dessous de 150°C sauf le polyimide (PI). Cela signifie que le post-traitement ne pourra pas être opéré à haute température : dans ce cas la durée du recuit devra être prolongée pour atteindre les performances électriques visées, ce qui peut être pénalisant pour maintenir des cadences industrielles.

Plusieurs solutions sont possibles pour remédier à cette difficulté. L'utilisation du PI permet d'atteindre des hautes températures sans dégradation du substrat mais son coût est important pour des applications industrielles. Des méthodes alternatives au recuit à l'étuve existent afin de rendre le recuit sélectif sur la piste sans endommager le substrat. Elles sont détaillées dans les paragraphes suivants mais ne peuvent pas être toutes mises en œuvre dans le cas de la plastronique.

I.1.3.3.a) Recuit sélectif infrarouge

Le recuit proche infrarouge (NIR) consiste à exciter des molécules à des longueurs d'onde de $0,7$ à $1000 \mu\text{m}$. Pour cela l'échantillon est placé sur un convoyeur qui l'achemine sous les lampes NIR, comme montré sur la Figure I-7. Le système peut être doté d'un réflecteur qui permet de réfléchir une partie de l'énergie à nouveau sur l'échantillon. Cette méthode est rapide, sélective, adaptée à des grandes ou à des petites surfaces planes et sans contact.

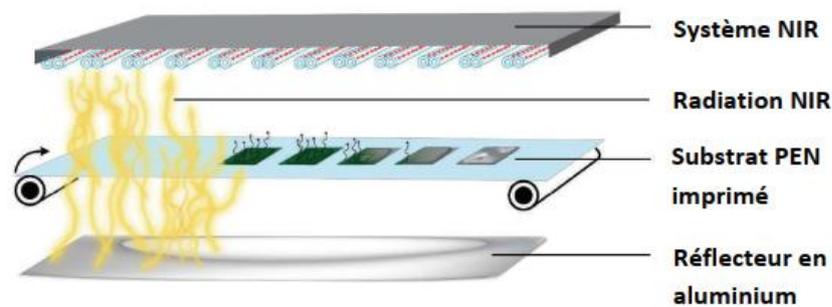


Figure I-7 : Principe du recuit infrarouge [44]

Dans le cas du recuit NIR sur substrat plastique, la bande de fréquence proche infrarouge variant de $0,8$ à $1,5 \mu\text{m}$ est la plus intéressante car elle correspond à une absorption minimale de l'énergie par les substrats plastiques. Sur la Figure I-8 le spectre d'émission de lampe NIR $5,4 \text{ kW}$ et l'absorption des substrats en fonction du même intervalle de longueur d'onde est représenté [26]. Les substrats plastiques sont les courbes désignées par « HS-PET ». Les encres sont représentées par les courbes en pointillés. Au maximum de l'émission des lampes NIR (environ 1000 nm), les substrats PET et papier ont une absorption proche de 0 et les encres présentent une absorption entre 20 et 60% . Ainsi, seules les encres sont recuites.

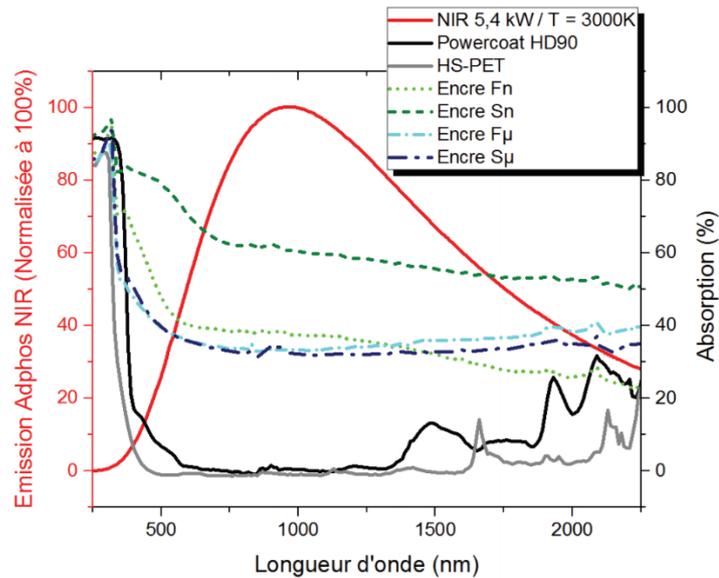


Figure I-8 : Spectre d'émission de l'infrarouge et d'absorption des infrarouges par les encres argent [26]

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour cette technique de recuit :

- La distance entre les lampes et le substrat (d)
- La puissance des lampes (P) ou l'énergie émise (E)
- Le temps d'expositions (t)
- Le nombre d'expositions

Ces paramètres doivent être étudiés afin d'éviter les dommages causés à la piste par une exposition trop longue ou trop puissante aux lampes [22,44].

Dans le Tableau 5 plusieurs exemples bibliographiques de résultats obtenus par recuit IR sur des dispositifs d'électronique imprimée sont référencés. La résistance carrée est désignée comme R_s (en $\Omega \cdot \text{sq}^{-1}$) et la résistivité comme ρ (en $\Omega \cdot \text{m}$).

Tableau 5 : Exemple de résultats obtenu par recuit IR en fonction des paramètres de ce recuit (NP, nanoparticules, MP, microparticules)

Référence	Denneulin A. et al., 2011 [45]	Sowade E. et al., 2015 [44]	Thenot V. , 2017 [26]
Encre	NP d'argent (20 nm)	NP d'argent	MP d'argent (1-10 µm)
Méthode d'impression	Jet d'encre piézoélectrique	Jet d'encre piézoélectrique	Sérigraphie
Substrat	Papier	PEN 125 µm	Powercoat HD papier
Epaisseur de dépôt (µm)	2 (une couche)	8	12,7
Résistance carrée (recuit de référence à l'étuve)	20 min 150°C $R_s=1,6 \Omega.sq^{-1}$	30 min 130°C $R_s=0,8 \Omega.sq^{-1}$	10 min 150°C $R_s=0,06 \Omega.sq^{-1}$
Paramètres de recuit IR	d=6 cm t=2 min, P=3,54 J.cm ⁻²	d=7,1 cm t=6,86 s, E=82,3 J.cm ⁻² $T_{fil}=2600^\circ C$	d=7 cm t=1,5 s, E=22,3 J.cm ⁻²
Résistance carrée, R_s ($\Omega.sq^{-1}$) - recuit IR	1,9	0,25	0,02
Résistivité, ρ ($\mu\Omega.cm$) - recuit IR	380	200	24

I.1.3.3.b) Recuit par lumière pulsée

Le recuit à lumière pulsée (*Intense Pulsed Light sintering* ou *IPL*) est une technique de recuit sélective, sans contact et rapide. Une lampe à xénon est utilisée, son rayonnement s'étend de 350 nm à 950 µm [46] : cette gamme de valeurs peut varier légèrement selon la lampe à xénon utilisée [47]. Comme présenté en Figure I-9, le substrat imprimé est placé sous la lampe à xénon qui effectue le recuit de l'encre par irradiation. Différents paramètres peuvent influencer le recuit : la distance entre le substrat et la lampe (d), l'énergie de la lampe (E), la durée de l'impulsion (t_{pulse}) et l'intervalle entre chaque impulsion (t_i).

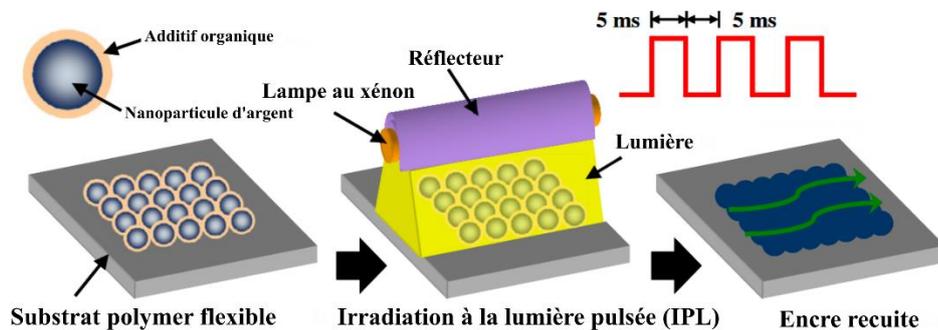


Figure I-9 : Principe du recuit à lumière pulsée pour des encres à nanoparticules d'argent [48]

Dans l'article [48] un phénomène de gonflement (*swelling effect*) de la piste imprimée est mentionné. Il est décrit sur la Figure I-10 : après dépôt de l'encre sur le substrat, la surface est solidifiée par la première impulsion cependant l'encre en dessous contient toujours des solvants. Ceux-ci sont vaporisés lors des impulsions suivantes ce qui crée une déformation de la piste.

Cela montre une pénétration du rayonnement dans la piste limitée à une certaine épaisseur évaluée à 11 μm dans [49].

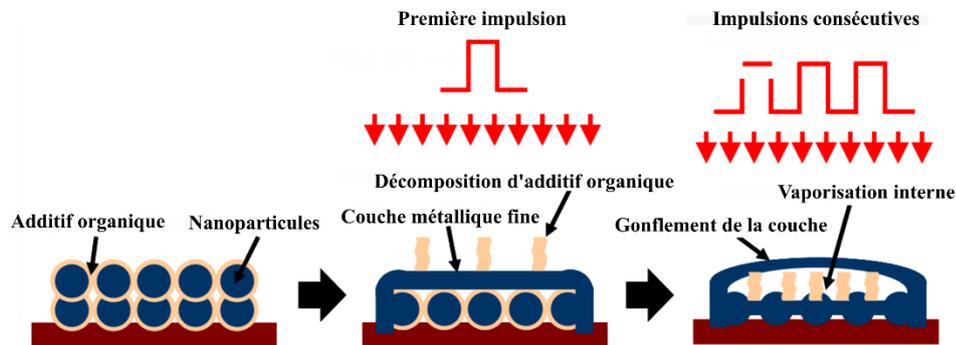


Figure I-10 : Phénomène de gonflement de la couche d'après [48]

Plusieurs exemples de résultats obtenus grâce au recuit IPL sont résumés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Exemples de résultats obtenus par recuit IPL en fonction des paramètres de ce recuit (NP, nanoparticules, MP, microparticules)

Référence	Kang et al., 2011 [50]	Thenot, 2017 [26]	Jang et al., 2021 [46]
Encres	NP d'argent	MP d'argent	MP et NP cuivre
Méthode d'impression	Jet d'encre	Sérigraphie	Sérigraphie
Substrat	Fibre de verre avec polymère	HS-PET	Polyimide
Épaisseur de dépôt (μm)	10	15-30	10
Résistivité, ρ (recuit de référence à l'étuve)	200°C 30 min $\rho=4 \mu\Omega.\text{cm}$	150°C 60 min $\rho=31.3 \mu\Omega.\text{cm}$	-
Paramètres de recuit IPL	Plaque chauffante à 85°C durant impression, 85°C 5 min 3 pulses (4,6,6 ms), $t_i=5 \text{ ms}$, $E=50 \text{ J.cm}^{-2}$	20 pulses, $t_{\text{pulses}}=85 \mu\text{s}$, $t_i=500 \mu\text{s}$, $E=5,91 \text{ J.cm}^{-2}$	1 pulse $t_{\text{pulses}}=5 \text{ ms}$, $E=5 \text{ J.cm}^{-2}$
Résistivité, ρ ($\mu\Omega.\text{cm}$) - recuit IPL	4,7	85	11

I.1.3.3.c) Recuit sélectif ohmique

Le recuit ohmique ou électrique est une méthode qui consiste à faire circuler du courant dans une ligne conductrice imprimée préalablement séchée, et d'induire par effet Joule, un échauffement qui finalise le recuit la piste. Le recuit ohmique est rapide, sélectif sur le dépôt et peut être accompagné d'un suivi en temps réel de l'évolution de la résistance de la piste. Un contact physique avec la piste est nécessaire.

Sur la Figure I-11, le schéma pour réaliser un recuit ohmique est présenté [51]. Un générateur de courant (DC) est relié à des pointes qui vont injecter le courant dans la piste. Une

résistance en série (R_s) est ajoutée afin de visualiser l'évolution du courant et de protéger la piste lors de la diminution de sa résistance.

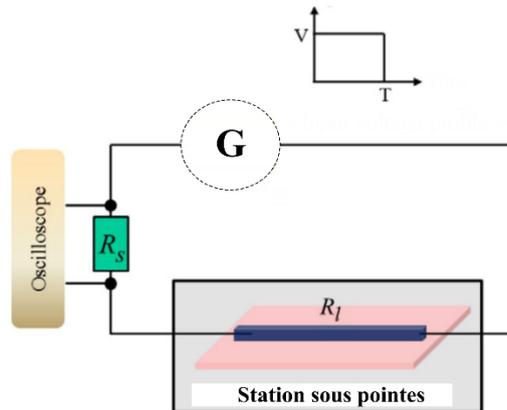


Figure I-11 : Principe du recuit ohmique [51]

Un pré-recuit, généralement réalisé à l'étuve, est nécessaire afin de pouvoir faire circuler du courant dans une ligne sans échauffement trop important et également de réaliser le contact avec la ligne sans la détériorer. La résistance de la piste se calcule avec l'équation suivante :

$$I = \frac{U}{R_s + R_l} \quad (I.1)$$

$$R_l = \frac{U}{I} - R_s \quad (I.2)$$

Avec :

- I le courant (A)
- U la tension (V)
- R_s la résistance en série (Ω)
- R_l la résistance de la ligne imprimée qui varie en fonction du temps (Ω)

Dans [52] le recuit thermique et électrique sont comparés sur une ligne imprimée en jet d'encre. La ligne est imprimée avec une encre à nanoparticules d'argent sur du PI. Sa largeur est de $168,9 \mu\text{m}$, son épaisseur de $75 \mu\text{m}$ et sa longueur est de $52,1 \text{ mm}$. Le recuit thermique est effectué à 200°C pendant 60 min, dans le meilleur cas pour le recuit thermique une résistivité de $9,4 \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ est mesuré. Avant de réaliser un recuit ohmique, la ligne est pré-recuite à 100°C pendant 5 min afin d'atteindre quelques $\text{k}\Omega$ de résistance. Le recuit ohmique est effectué en utilisant une fonction de plafonnement du courant (OCP pour *Over Current Protection*) afin de ne pas atteindre un courant trop élevé. La tension maximale est fixée à 20 V. Pour un OCP de 0,6 A, la résistivité obtenue est de $3,6 \pm 0,3 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ en environ 15 s et donc bien en-dessous de celle obtenue par recuit thermique.

Le suivi de la température est un élément important pour veiller à ne pas détériorer le substrat. Dans [53] une encre argent à nanoparticules est imprimée par jet d'encre sur du papier. Un recuit ohmique avec un courant de 450 mA pendant 20 s est utilisé. Le suivi de la température est réalisé avec une caméra infrarouge. Lorsque la piste atteint 130°C , la

température du substrat reste limitée à 60°C. Ce recuit permet d'atteindre une résistivité de 2,7 $\mu\Omega$.cm sans détérioration du substrat.

Dans l'article [8] le même substrat (PC+ABS) et la même encre (Electrodag 418 SS) que ceux utilisés dans cette thèse sont mis en œuvre avec une technique d'impression de micro-dépose à vis sans fin (Ecopen). Les tests sont réalisés sur des lignes de largeur 700 à 900 μm , d'épaisseur 35 à 45 μm et de longueur 60 mm. Deux protocoles de recuit sont proposés dans le Tableau 7 pour un même motif imprimé.

Tableau 7 : Description des protocoles de recuit de [8]

	<i>Etape 1</i>	<i>Etape 2</i>	<i>Etape 3</i>
Protocole 1 (P1)	1,5 A durant 35 s	1,8 A durant 35 s	2 A durant 15 s
Protocole 2 (P2)	1,8 A durant 35 s	1,8 A durant 35 s	2 A durant 15 s

Les résultats montrent que le protocole P1 n'engendre pas de dommage au substrat alors que le protocole P2 engendre des déformations.

Entre deux pulsations, un temps d'attente de 30 s est observé afin de faire redescendre la température. Le recuit de référence est réalisé à l'étuve à 110°C durant 90 min, la résistivité mesurée est de 332 \pm 41 n Ω .m. Pour le protocole P1, une résistivité de 310 \pm 37 n Ω .m est mesurée et pour le protocole P2, 286 \pm 31 n Ω .m. Ainsi le recuit ohmique a permis de réduire la résistivité de la piste et le temps de recuit nécessaire.

Dans [54] le recuit ohmique (4A durant 10 s) est utilisé sur des structures 3D internes et externes contenant des vias. Les auteurs recommandent l'utilisation d'encres spécifiquement réalisées pour ces interconnexions.

Cette méthode présente certains inconvénients : elle peut donner lieu à une inhomogénéité du recuit le long de la piste. Dans [54] un recuit proche du frittage est observé sur les clichés MEB : on observe une bonne coalescence des particules entre elles au milieu d'une piste imprimée, à contrario cela n'est pas observé sur les bords de la piste. Le recuit ohmique nécessite également le contact direct des pointes sur la piste. Dans [53] une solution à cet inconvénient est présentée en utilisant un courant alternatif au-dessus de la piste imprimée, cela crée par couplage un courant induit dans la structure imprimée et permet son recuit sans contact. Une fréquence de 1.8 GHz et une tension de 40 V sont utilisées. La résistance carrée diminue de 60 k Ω .sq $^{-1}$ à 1 k Ω .sq $^{-1}$.

Dans le Tableau 8 plusieurs résultats d'études sur le recuit ohmique sont résumés. I_{max} et U_{max} sont les plafonnements, respectivement, du courant et de la tension.

Tableau 8 : Exemples de résultats obtenus par recuit ohmique en fonction des paramètres de ce recuit (NP, nanoparticules, MP, microparticules)

Référence	Allen et al., 2008 [53]	Escobedo et al., 2018 [52]	Jang et al., 2013 [51]	Tricot et al., 2021 [8]
Encres	NP d'argent	NP d'argent	NP d'argent	MP d'argent
Méthode d'impression	Jet d'encre	Jet d'encre	Jet d'encre	Micro-dépose
Substrat	Papier	PI	Papier	PC+ABS
Épaisseur de dépôt (μm)	0,9	1	-	35 à 45
Résistivité, ρ - recuit de référence à l'étuve	120°C 20 min, $\rho=33,4 \mu\Omega.\text{cm}$	200°C 15 min $\rho=9,4 \mu\Omega.\text{cm}$	-	110°C 30 min
Paramètres de recuit ohmique	$R_s=330 \Omega$, $U=50\text{V}$ $t=4 \text{ ms}$, $I_{\text{max}}=150 \text{ mA}$	Densité de courant : 2280-3920 A/mm ² $U_{\text{max}}=20 \text{ V}$	25V 10 s puis 65V 5 s	1,5 A durant 35 s 1,8 A durant 35 s 2 A durant 15 s
Résistivité, ρ ($\mu\Omega.\text{cm}$) recuit ohmique	2,7 à 6,5	3,6	3	0,3

I.1.3.3.d) Recuit sélectif laser

Le recuit laser consiste à irradier la zone à recuire avec une source laser dont la longueur d'onde unique dépend du type de laser utilisé : 488 nm pour le laser Argon, 1064 nm pour le laser Nd :YAG ou 980 nm pour le laser diode [55] par exemple. Une bande de longueur d'onde peut aussi être mise en œuvre avec une source laser à longueur d'onde pilotable [56]. L'exposition de la piste au laser s'effectue localement, le faisceau étant concentré sur une zone de la piste.

Cette méthode est sélective et sans contact et le temps de réalisation est dépendant de la surface à recuire. Les paramètres principaux à optimiser pour le recuit laser sont : la vitesse de déplacement du faisceau, le type de laser et la puissance du laser [57].

Par son échauffement localisé le recuit laser est susceptible d'endommager le substrat : l'utilisation d'un mode pulsé permet de limiter l'échauffement local [58]. Dans [59], le recuit laser pulsé et continu sont comparés : selon l'auteur, les résistivités pour le laser continu, pulsé et le recuit à l'étuve (60 min 220°C) sont similaires : de 5,4 à 6,1 $\mu\Omega.\text{cm}$. Dans [60], un laser pulsé est utilisé à une fréquence de 200 kHz, à une vitesse de 10 mm/s et à une puissance variant de 700 à 900 J/cm². La résistance carrée obtenue diminue lorsque la puissance augmente de 136 Ω/sq pour 700 J/cm² à 0.02 Ω/sq pour 900 J/cm². Le laser pulsé est plus difficile à mettre en œuvre que le laser continu car la surface irradiée est exposée périodiquement (1 kHz à 10 MHz) au laser et donc moins de chaleur est transmise. La vitesse doit alors être adaptée à la fréquence de pulsation du laser pour minimiser la résistance sans endommager la piste.

Dans le Tableau 9 des résultats obtenus par recuit laser sont résumés. λ est la longueur d'onde (nm) du laser, P la puissance (W) du laser, v la vitesse (mm/s) de déplacement du laser,

E_{pulse} , f_{pulse} , t_{pulse} sont l'énergie, la fréquence et le temps d'une pulsation pour le cas d'un laser pulsé.

Tableau 9 : Exemple de résultats obtenu par recuit laser en fonction des paramètres de ce recuit (NP, nanoparticules, MP, microparticules)

Référence	Khan et al.,[61]	Lesyuk et al.,[62]	Kumpulaine et al., 2011 [59]
Encre	NP d'argent (50 nm)	NP d'argent (9,2 nm)	NP d'argent (30-50 nm)
Méthode d'impression	Aerosoljet	Jet d'encre	Jet d'encre
Substrat	PI	Céramique	PI
Épaisseur de dépôt (μm)	0,64-0,91	2,5	-
Résistivité, ρ - recuit de référence à l'étuve	220°C 60 min $\rho=13 \mu\Omega.\text{cm}$	-	220°C 60 min $\rho=4,8 \text{ à } 6,1 \mu\Omega.\text{cm}$
Paramètres de recuit laser	$\lambda=1064 \text{ nm}$ $P=125-750\text{mW}$, $v=5 \text{ mm/s}$ Laser continu	$\lambda=1064 \text{ nm}$ laser pulsé $E_{\text{pulse}}=0,5 \mu\text{J}$ $f_{\text{pulse}}=1\text{kHz}$ $t_{\text{pulse}}=5\mu\text{s}$ $v=10 \text{ mm/s}$	$\lambda=1064 \text{ nm}$ Laser pulsé Laser continu
Résistivité, ρ ($\mu\Omega.\text{cm}$) - recuit laser	7	8	3,6-5,5

I.1.3.3.e) Autres méthodes sélectives de recuits

➤ Le recuit micro-ondes

Le recuit micro-ondes utilise les ondes électromagnétiques afin de recuire sélectivement les pistes. C'est une méthode sans contact, rapide et sélective. Les matériaux, selon leurs caractéristiques électromagnétiques absorbent plus ou moins les ondes. la profondeur de pénétration d'un matériau se calcule de la façon suivante [63] :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (I.3)$$

Avec :

- δ est l'effet de peau (m)
- σ est la conductivité électrique (S/m)
- f est la fréquence (Hz)
- μ est la perméabilité magnétique d'un matériau (H/m)

Ainsi, un matériau très conducteur absorbera la puissance délivrée mais les ondes pénétreront peu dans le matériau. Par exemple, pour l'or, l'argent ou le cuivre à 2,54 GHz, la profondeur de pénétration est de 1,3 μm à 1,6 μm [63].

Dans [63] une résistivité de 30 $\mu\Omega.\text{cm}$ a été mesurée pour un recuit micro-ondes de 300 W sur une piste de 140 μm de largeur et de 4.5 μm d'épaisseur imprimée en jet d'encre, soit 20 fois moins que la piste recuite à l'étuve.

Dans [64] une combinaison du recuit IPL et micro-onde a permis d'atteindre $4 \mu\Omega.cm$ en 15 secondes pour une ligne de $2 \mu m$ d'épaisseur et de $500 \mu m$ de large imprimée avec une encre à nanoparticule d'argent sur substrat polyimide.

➤ Le recuit plasma

Le plasma est un état de la matière très haut en énergie car il contient des ions, des radicaux libres et des électrons. Cette énergie en contact avec la piste imprimée suffit à recuire à basse température [65]. Dans [66] la méthode de recuit par plasma est définie comme sélective sur les pistes argent. Des problèmes de profondeur de pénétration ont également été relevés.

Cette technique présente un inconvénient majeur : elle est plus lente que les autres méthodes : à 60 min de recuit pour une puissance de 40 W, la résistivité obtenue est de $4 \mu\Omega.cm$ [66] pour un équivalent en recuit thermique de $3,5 \mu\Omega.cm$ pour une même durée. Une solution est proposée dans [67] dans lequel un crayon à plasma (300 W) est utilisé et se déplace, à la façon du laser, sur la piste à recuire, une résistivité de $13 \mu\Omega.cm$ est obtenue en 7 minutes.

I.1.3.3.f) Synthèse des méthodes de recuit

Suite à la description des différentes méthodes de recuit, le Tableau 10 synthétise l'état de l'art réalisé sur le recuit selon 4 critères : sa durée, sa sélectivité, sa complexité de mise en œuvre et ses limites.

Tableau 10 : Synthèse des méthodes de recuit

Méthode	Durée	Sélectivité	Mise en œuvre	Limites
Thermique (étuve)	De 30 minutes à 1 h	Non	Facile	-Non sélective (détérioration du support imprimé) -Lente
Proche-Infrarouge (NIR)	Quelques secondes	Oui	Facile	-
Lumière pulsée (IPL)	Quelques millisecondes	Oui	Facile	« <i>swelling effect</i> »
Ohmique	Quelques minutes	Oui	Moyen	-Inhomogénéité du recuit -Contact direct avec l'échantillon à recuire -Géométrie des motifs limitée à des pistes
Laser	Fonction de la longueur de la piste (vitesse de 5 à 10 mm/s)	Oui	Complexe	-Gestion de la trajectoire pour suivre la piste -Sécurité supplémentaire liée à l'utilisation du laser
Micro-onde	Quelques secondes	Oui	Moyen	-Profondeur de pénétration
Plasma	Quelques minutes à 1 h	Oui	Moyen	-Profondeur de pénétration -Méthode lente

I.1.3.4. *Micro-dépose*

La technique de micro-dépose (*microdispensing*) d'encre consiste à déposer en continu de l'encre sur un substrat, généralement à l'aide d'une aiguille. Divers diamètres d'aiguille sont disponibles et doivent être choisis en fonction de la taille de la piste à imprimer mais également de la taille des particules composant l'encre afin d'éviter de la boucher. La micro-dépose permet l'utilisation d'encres de viscosité comprise entre 1 et 1×10^6 mPa.s [21].

Il existe diverses techniques de micro-dépose :

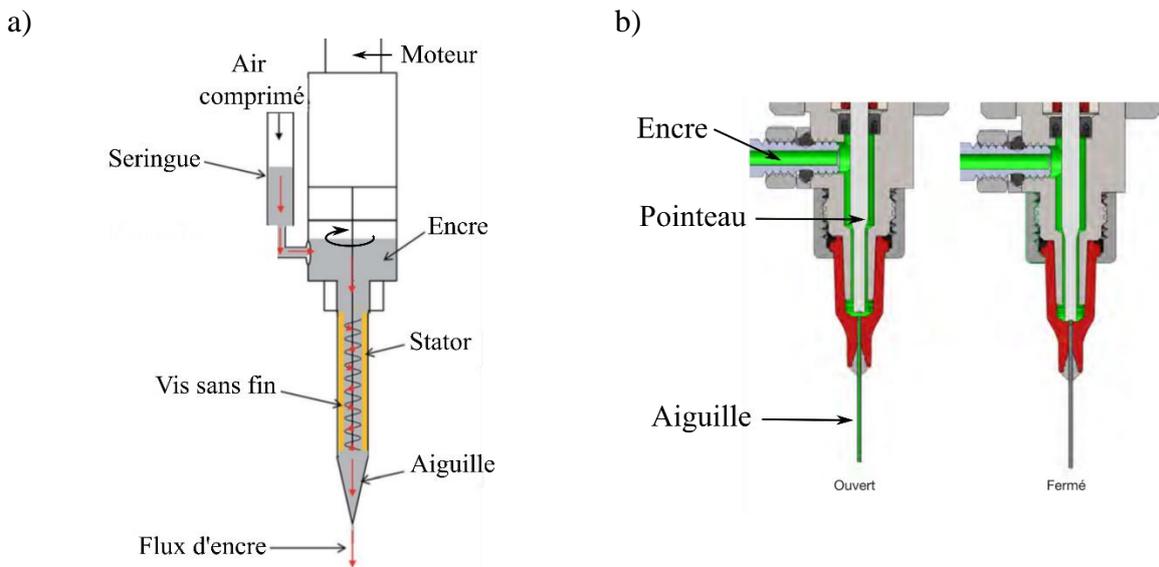
- **Vis sans fin** : Une seringue pressurisée contenant l'encre est fixée au dispositif à vis sans fin (Figure I-12). L'encre s'écoule de la seringue vers la vis puis dans l'aiguille. La vitesse de rotation de la vis permet de contrôler l'écoulement depuis le début jusqu'à la fin de ligne. En particulier, elle pourra tourner en sens inverse en fin d'impression pour empêcher l'écoulement de l'encre [68].
- **Valve** : Une seringue pressurisée contenant l'encre fonctionnelle est reliée à un pointeau qui obture le passage de l'encre en direction d'une aiguille dirigée vers le

support (Figure I-12). Le pointeau s'ouvre lors de l'impression pour permettre à l'encre de s'écouler à travers l'aiguille puis de se déposer sur le substrat. Le pointeau est ensuite fermé à la fin de l'impression.

- Seringue seule : la seringue pressurisée peut être utilisée seule pour déposer de l'encre. La pression contrôle le débit d'encre. La taille de l'aiguille positionnée à son bout peut être choisie afin de régler les paramètres géométriques du dépôt.

Cette technique de micro-dépose implique la gestion de plusieurs paramètres d'impression : la distance entre l'aiguille et le substrat (d), le diamètre de l'aiguille, la vitesse d'impression et la pression dans la seringue. Dans [68] il est recommandé que la distance d'impression d soit environ égale au diamètre de l'aiguille ce qui peut être difficile à respecter.

La technique de micro-dépose présente un avantage majeur par rapport aux autres technologies d'IDE : l'aiguille permet d'imprimer à l'intérieur d'objets ou dans des espaces très réduits grâce à son faible encombrement. La principale difficulté de cette technique est d'obtenir un début et une fin de ligne homogène avec le reste de la ligne : en effet à chaque démarrage ou arrêt, un excédent d'encre est susceptible d'être déposé [69].



Dans le Tableau 11 quelques exemples d'applications réalisées avec la technique de micro-dépose sont présentés.

Tableau 11 : Exemples d'applications réalisées avec la technique d'IDE de micro-dépose (MP, microparticules)

Référence	Roberson et al., 2012 [54]	Hawatmeh et al., 2016 [71]	Tricot et al., 2018 [68]
Application	Etude du Recuit ohmique	Antenne multi-matériel	Caractérisation du procédé micro-dépose
Encre	MP d'argent (1,7 μm)	MP d'argent	MP d'argent
Substrat	PI	ABS 3D imprimé en FDM	PC+ABS
Largeur du dépôt (μm)	-	-	245-1025
Épaisseur du dépôt (μm)	5,5	50-75	30-50
Propriétés électriques	$\sigma=6,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ $\rho=164 \text{ n}\Omega.\text{m}$	$\sigma=2 \times 10^6 \text{ S/m}$ $\rho=500 \text{ n}\Omega.\text{m}$	$\sigma=3,2 \times 10^6 \text{ S/m}$ $\rho=310 \text{ n}\Omega.\text{m}$

I.1.3.5. Aérosoljet

La technique par aérosol ou aérosoljet a été développée par l'entreprise OPTOMECA et brevetée en 2004 [72]. Cette technique projette des microgouttelettes d'encre focalisée sur le substrat afin de former le motif imprimé. Pour cela un aérosol est créé en mélangeant l'encre et un gaz (généralement du nitrogène) comme montré sur la Figure I-13. L'aérosol est amené jusqu'à la buse où un gaz est utilisé pour focaliser le flux de microgouttelettes sur le substrat [73,74]. Pour ce procédé, des encres dont la viscosité peut atteindre 1000 mPa.s sont utilisées.

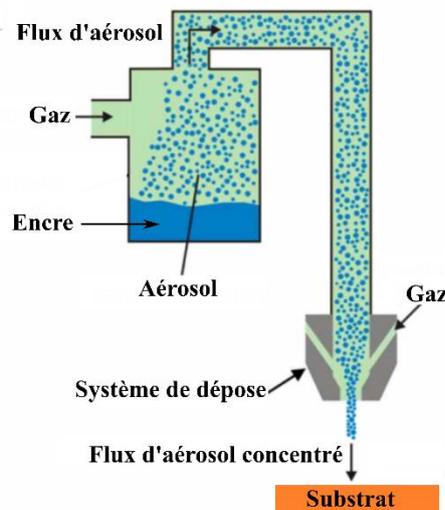


Figure I-13 : Principe de la technique de l'aérosoljet adapté de [75]

La vitesse importante des microgouttelettes au moment de l'impression permet d'avoir une distance d'impression entre le substrat et la buse assez importante : entre 2 et 5 mm. Cette technique permet également d'imprimer divers types de fluides fonctionnels tels que des encres à nanoparticules de métal, diélectriques, polymères, adhésives, à nanotubes de carbone ou encore des matériaux biologiques [73,74].

Dans [76] un phénomène de projection de microgouttelettes en dehors du motif imprimé est relevé ce qui peut être problématique pour certains dispositifs radiofréquences.

Dans le Tableau 12, des exemples de résultats obtenus avec la technique d'impression par aérosol sont présentés.

Tableau 12 : Exemple d'application réalisé avec la technique d'IDE par aérosol (CNT, nanotubes de carbone, NP nanoparticules)

Référence	Zhao et al., 2021 [77]	Paulsen et al., 2012 [78]	Chang et al., 2015 [79]
Application	Etude sur la conductivité	Structures 3D imprimées	Capteur de pression
Encre	CNT et NP d'argent	NP d'argent	NP d'argent (10 nm)
Substrat	Kapton	Plastique	Impression 3D SLA
Largeur du dépôt	13-22,5 µm	30 µm	-
Épaisseur du dépôt (µm)	0,5-0,6	10	2
Propriétés électriques	$2,35 \times 10^5$ S/m	-	-

I.1.3.6. Jet d'encre

Le procédé jet d'encre est une méthode d'impression par jet de gouttes. Elle a été brevetée en 1965 comme une alternative pour l'imprimerie de labour ou au développement de photographies traditionnelles en permettant d'imprimer des petites quantités à un faible coût, notamment pour les photographies [80]. Le principe est d'éjecter à une fréquence élevée des gouttes d'encre sur le substrat afin de former des motifs imprimés. Plusieurs buses peuvent être utilisées simultanément. Les encres utilisées ont une viscosité comprise entre 1 et 40 mPa.s [81].

Il existe deux méthodes d'impression jet d'encre :

- La méthode continue (*Continuous InkJet ou CIJ*)

Les gouttes sont éjectées de manière continue sur le substrat. Un champ électrique est généré par des électrodes et guide les gouttes jusqu'au substrat. Les gouttes non chargées électriquement sont récupérées dans une gouttière. Ce procédé est peu utilisé en électronique pour sa faible précision et son manque de compatibilité avec les encres [27,82]. La Figure I-14 présente un schéma de la technique jet d'encre en continu.

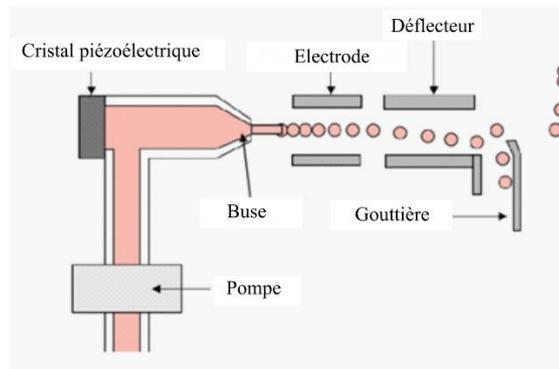


Figure I-14 : Principe technique du jet d'encre en continu adapté de [27]

- La méthode discrète (*Drop On Demand ou DOD*)

Cette méthode permet de générer les gouttes à la demande. Ces gouttes sont éjectées en augmentant la pression dans le compartiment contenant l'encre en utilisant un élément piézoélectrique ou chauffant comme montré sur la Figure I-15. Cette technique est utilisée pour l'électronique car permet une importante précision d'impression (300 à 600 dpi) [27].

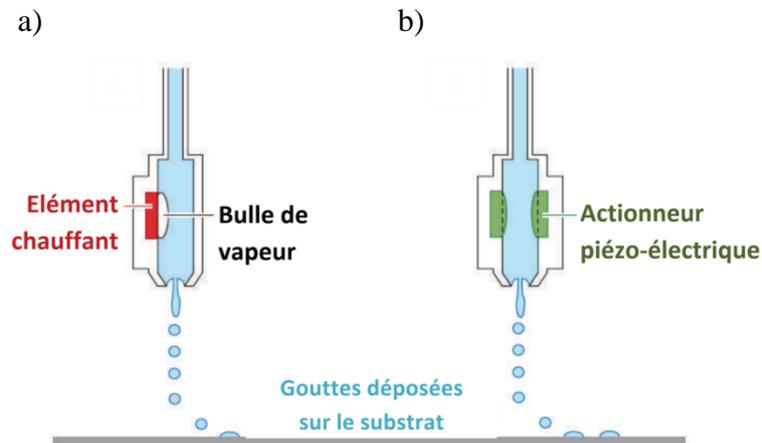


Figure I-15 :Principe du jet d'encre discret a) avec un actionneur thermal b) avec un actionneur piézoélectrique adapté de [83]

Un phénomène est régulièrement reporté dans la littérature, appelé « coffee ring ». Lors du séchage d'une goutte contenant des particules, celles-ci ont tendance à migrer vers le périmètre de la goutte par un mécanisme de capillarité [84].

Cet effet donne lieu à certains défauts : il augmente la rugosité de l'impression et la rend moins précise en termes de dimensions. Le défaut peut être limité en contrôlant l'atmosphère de séchage de la goutte pour avoir une pression de vapeur plus importante ou bien en utilisant des solvants ayant des pressions de vapeur plus élevées [83].

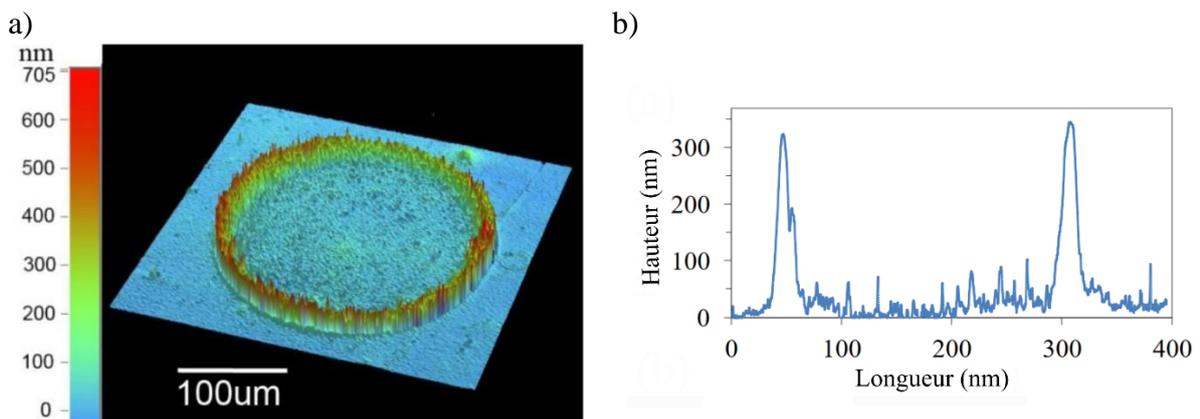


Figure I-16 : a) Profil 3D b) Profil 2D de l'effet « coffee ring »[85]

La technologie jet d'encre suscite un grand intérêt dans la recherche pour diverses applications. Cependant, les encres utilisées ne permettent pas d'atteindre des épaisseurs supérieures à 1 μm lorsqu'une couche est déposée à cause de leur faible viscosité. Il est possible cependant de modifier la composition de l'encre afin de limiter cet effet [86,87].

Dans le Tableau 13, des exemples d'applications réalisées avec la technique jet d'encre sont présentés. L'épaisseur obtenue est toujours de l'ordre de quelques micromètres avec plusieurs couches. Cette faible épaisseur peut être limitante pour des impressions sur des substrats rugueux (imprimé en 3D par exemple).

Tableau 13 : Exemple d'application réalisé avec la technique d'IDE jet d'encre (NP, nanoparticules)

Référence	Chiolerio et al., 2012 [88]	Yepu Cui et al., 2019 [89]	Tehrani et al., 2016 [90]
Application	Ligne de transmission	Capteur de pression	Electronique sur emballage
Encre	NP d'argent	NP d'argent	NP d'argent
Substrat	Kapton	SLA 3D	Polymère
Largeur du dépôt	630 µm	-	120 µm
Epaisseur du dépôt	2-6 µm (6 couches)	0,8 µm (1 couche)	20 µm (5 couches)
Propriétés électriques	$2,9 \times 10^6$ S/m	-	1×10^7 S/m

I.1.3.7. Jetting

La technique jetting a un fonctionnement similaire à la technique jet d'encre. Cependant, elle permet l'utilisation d'encres beaucoup plus visqueuses : de 1 à 100000 mPa.s [26,91]. De l'air comprimé est utilisé dans le compartiment de stockage de l'encre pour assurer un écoulement même pour des encres très visqueuses. La technique jetting est utilisée généralement en monobuse et permet l'application de colle ou de pâte à souder par exemple [92].

Les dispositifs d'impression jetting sont constitués d'un piston coulissant dans un cylindre à l'intérieur duquel s'écoule l'encre contenue dans une seringue pressurisée. La fermeture du piston permet l'éjection d'une goutte d'encre. Les temps de fermeture, ouverture, montée et descente du piston peuvent être paramétrés. Il est possible de relier ces paramètres et les propriétés de l'encre utilisée.

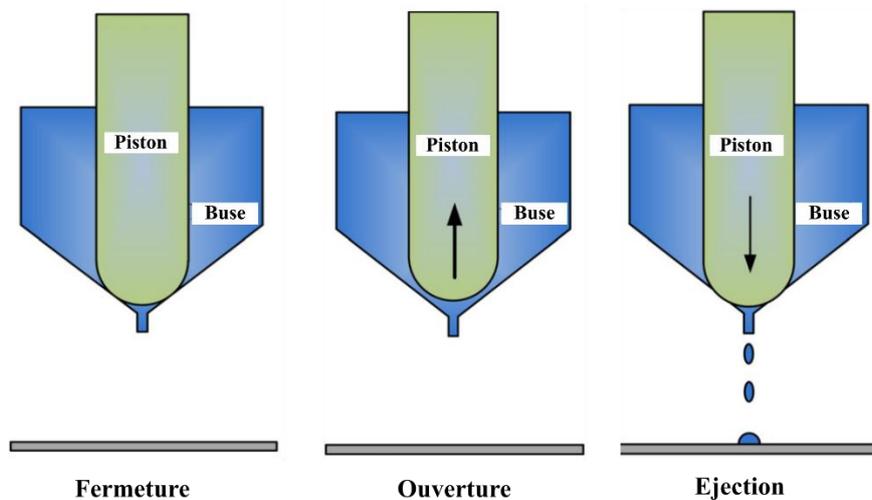


Figure I-17 : Principe technique de la technologie jetting adapté de [93]

Pour éjecter une goutte il faut que la force d'inertie de celle-ci soit plus importante que la force de frottement. Ces forces sont définies par les équations suivantes [94] :

$$F_i = \rho v^2 d^2 \quad (1.4)$$

$$F_\mu = v\mu d \quad (1.5)$$

Avec :

- ρ la densité du fluide (sans unité)
- d le diamètre de la buse (m)
- v la vitesse du fluide (m/s)
- F_i la force d'inertie du fluide (N)
- F_μ la force de frottement visqueuse (N)
- μ la viscosité dynamique (Pa.s)

Ainsi pour pouvoir éjecter une goutte, la condition suivante doit être remplie :

$$F_i > F_\mu \Rightarrow v > \frac{\mu}{\rho d} \quad (1.6)$$

La vitesse du fluide dépend de la pression à laquelle il est soumis. La pression peut être causée par la seringue pressurisée mais également par le piston sur le fluide. L'influence de la pression sur la formation de goutte a été étudiée en simulation et en mesures dans les articles [92,94,95].

Dans [96], un protocole innovant est proposé afin d'observer et d'optimiser les paramètres d'impression. Pour cela les auteurs ont utilisé un accéléromètre pour mesurer les vibrations du piston et connaître précisément chaque mouvement du piston. Il est ainsi possible de synchroniser une prise de photo rapide et le mouvement du piston. Les auteurs recommandent de ne pas élever la pression de la seringue pour leur système à plus de 2,5 bar car une formation de goutte supplémentaire est observée. De plus le couple de paramètre temps d'ouverture/temps de montée du piston doit être précisément choisi afin d'éviter le phénomène de « *wetting* » ou de double goutte. Ce phénomène a lieu lorsque la goutte ne s'éjecte pas et reste donc à l'entrée de la buse, elle bloque alors l'éjection des gouttes suivantes.

Dans la littérature, le jetting est utilisé principalement pour du dépôt d'adhésif, il existe peu de publications à propos de dépôt d'encre fonctionnelle. Dans [97] une encre à microparticules d'argent de viscosité 20 000 mPa.s est utilisée sur trois substrats différents : du PET (Ra=3 nm), du papier Powercoat® (Ra=10 nm) spécifique pour l'électronique imprimée et du papier classique (Ra=10000 nm). Cette technique permet d'imprimer sur des substrats avec des rugosités différentes en un seul passage. La rugosité a, cependant, un effet sur la conductivité du fait d'une plus grande irrégularité de la piste : les lignes imprimées avec une même encre sur des substrats rugueux ont une conductivité plus faible de 1,4 fois moins que les substrats moins rugueux [97].

1.1.3.1. Comparaison des technologies d'impression directe d'encre

Pour résumer les technologies IDE, le Tableau 14 propose une comparaison. La technique de micro-dépose et de jetting propose la plus large gamme de viscosité d'encre. L'aérosoljet permet des petites dimensions de dépose contrairement au jetting qui imprime les dimensions les plus grandes. Ces résultats de dimensions sont dépendant de l'encre utilisée. Le jet d'encre et le jetting permettent les vitesses d'impression les plus élevées ce qui peut être important dans un contexte industriel avec des cadences de production. La micro-dépose présente un inconvénient majeur : une faible distance aiguille-substrat (de l'ordre du diamètre de l'aiguille).

Tableau 14 : Comparaison des techniques IDE

	<i>Micro-dépose</i>	<i>Aérosoljet</i>	<i>Jet d'encre</i>	<i>Jetting (goutte)</i>
<i>Viscosité (mPa.s)</i>	0,5-1x10 ⁶ [21]	Jusqu'à 1000 [78]	1-40 [81]	0,5-2x10 ⁶ [97]
<i>Largeur de dépôt (µm)</i>	245-1025 [68]	13-30 [78,79,98]	120-630 [88-90]	450-600 [97]
<i>Épaisseur de dépôt (µm)</i>	6-50 [54,68,71]	0,5-10 [78,79,98]	0,8-20 [88-90]	14-40 [97]
<i>Vitesse maximale d'impression [97] (mm/s)</i>	20	10	80	100
<i>Distance système d'impression-substrat [97] (mm)</i>	0,2	1-5	1	1

I.1.3.2. Robots pour dispositifs IDE

Un robot est un système automatique conçu pour accomplir des tâches précises. Le terme « robot » (*robota* en tchèque) apparaît pour la première fois en 1920 dans une pièce de théâtre de science-fiction tchèque de l'auteur Karel Čapek, ce mot désigne alors « travail, besogne, corvée ». Les premiers robots apparaissent finalement dans les 1960 afin de remplacer les humains pour certaines tâches répétitives, dangereuses ou éprouvantes. Le premier robot industriel *Unimate* est vendu à partir de 1961 et est utilisé pour les lignes d'assemblage de General Motors.



Figure I-18 : Unimate le premier robot industriel [99]

Ce sont les robots industriels de portage qui correspondent à l'utilisation nécessaire pour les technologies IDE car le système d'impression ou la pièce doit être porté par un robot afin de contrôler la vitesse d'impression.

Les robots industriels peuvent être classés en plusieurs catégories comme montré dans le Tableau 15 [100]. Les robots cartésiens ne possèdent pas d'axe de rotation mais seulement des axes de translation et ils possèdent 3 degrés de liberté (DDL). Les robots cylindriques possèdent une rotation et 2 translations et possèdent 3 DDL. Les robots sphériques ont 2 rotations et une translation (*Unimate*) et possèdent 3 DDL. Les robots SCARA (*Selective Compliance Articulated Robot for Assembly*) sont des robots assez connus pour les opérations d'assemblage ou de placement de composants, pour leur rapidité et leur précision. Ils possèdent en général 3 DDL. Les robots anthropomorphes sont appelés de cette façon car ils imitent un bras humain, par ailleurs les liaisons sont nommées poignée, coude et épaule. Les liaisons sont toutes des rotations et ils peuvent avoir jusqu'à 6 DDL. Il est possible d'ajouter un 7^{ème} DDL en ajoutant un axe qui fait tourner la pièce. Pour chacune de ces catégories de robot il est possible d'ajouter un axe de rotation afin d'élever le DDL.

Il existe une dernière catégorie de robots, les robots parallèles qui ne sont pas présentés ici car ils ne sont pas utilisables pour la technologie IDE et sont principalement utilisé pour imiter des mouvements de roulis, tangage ou lacet lors de simulation de vol par exemple.

Tableau 15 : les catégories de robots industriels de portage

	<i>Nombre d'axes</i>	<i>Degrés de liberté</i>	<i>Illustration</i>
<i>Robots cartésiens</i>	3	3	 nordson.fr
<i>Robots cylindriques</i>	3	3	 hudsonrobotics.com
<i>Robots sphériques</i>	3	3	 densorobotics.com
<i>Robots SCARA</i>	3	3	 fanuc.com
<i>Robots anthropomorphes</i>	Jusqu'à 7	6	 Staubli.com

Les critères principaux pour les choix d'un robot industriel sont alors : les degrés de liberté nécessaires, le poids de charge, la superficie de son espace de travail, ses performances en précision et vitesse, et son encombrement.

Pour des applications plastroniques, au minimum 4 DDL sont nécessaire pour imprimer une pièce avec des surfaces en 3 dimensions. En revanche, une seule rotation du système d'impression sera possible donc cela limitera les formes. Avec 6 DDL, il n'y a plus de limitations en termes de trajectoires.

I.1.4. Comparaison des technologies plastroniques

Les trois technologies plastroniques, le LDS, l'électronique moulée et l'impression directe ont été définies dans les parties I.1.1, I.1.2, I.1.3. Le Tableau 16 propose un résumé des caractéristiques principales des technologies.

Tableau 16 : Comparaison des technologies plastroniques

	LDS [10]	Electronique moulée [2]	IDE [68,79]
Conductivité (S/m)	$35,7 \pm 19,4 \times 10^6$	$2,9 \times 10^6$	$0,6 \times 10^6$ à $3,3 \times 10^7$
% de conductivité par rapport au métal massif	57%	4%	0,9% à 5%
Épaisseur de métal (μm)	2-10	8-12	0,5-75
Largeur de métal minimale (μm)	150	60	13-1025
Rugosité Ra (μm)	2,2-3,9	-	1,4

La technologie LDS permet d'obtenir des motifs conducteurs dont la conductivité est plus élevée car elle utilise du cuivre et ne nécessite pas d'étape de recuit qui peut limiter la conductivité des pistes obtenues. Les technologies IDE peuvent également atteindre des conductivités similaires en utilisant certaines encres et un recuit efficace. L'épaisseur de métal est faible dans le cas du LDS comparée à l'électronique moulée et à l'IDE. Les techniques IDE présentent une largeur minimale variant de 13 à 1050 μm , ce qui montre une versatilité de ces techniques. Parmi les technologies plastroniques présentées, les techniques IDE présentent les largeurs et épaisseurs les plus faibles. Ces paramètres rendent alors les technologies IDE intéressantes pour le projet MINT.

Les technologies IDE présentées sont celles qui ont dépassé le statut de preuves de concept cependant il existe également d'autres technologies plastroniques en cours de développement tel que le micro-tamponnage 3D [101]. Le principe de cette technologie est de déposer de l'encre sur un substrat par contact mécanique d'un tampon encre comme montré sur la Figure I-19. Des capteurs et des circuits électroniques ont été réalisés sur des substrats 2D [102–104] et la thèse [101] montre également que le tamponnage peut être réalisée sur des surfaces 3D.

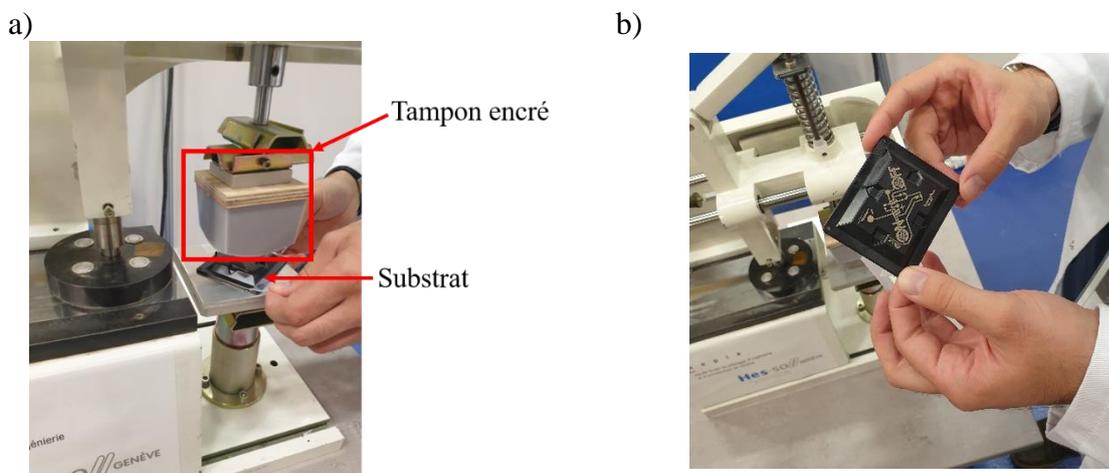


Figure I-19 : a) Système de tamponnage b) Circuit imprimé par micro-tamponnage

I.1.5. Classification des technologies plastroniques

La plastronique étant une technologie émergente, sa classification au sein des technologies additives plus traditionnelles n'est pas encore clairement définie. Dans cette partie, une proposition de classification est présentée en s'appuyant sur les définitions et les classifications de la littérature.

La fabrication additive est définie consensuellement comme un procédé d'ajout de matière couche par couche, à partir du modèle 3D d'un objet ou d'un dispositif [73,105–107]. Les trois procédés plastroniques décrits précédemment permettent de créer des dispositifs en ajoutant de la matière soit par dépôt d'encre pour l'impression directe et l'électronique moulée, soit par traitement chimique en faisant croître du cuivre pour le LDS. Les procédés plastroniques peuvent donc s'inscrire dans le classement des procédés de fabrication additive.

Vaezi [108] propose une classification des procédés additifs représentés en Figure I-20.

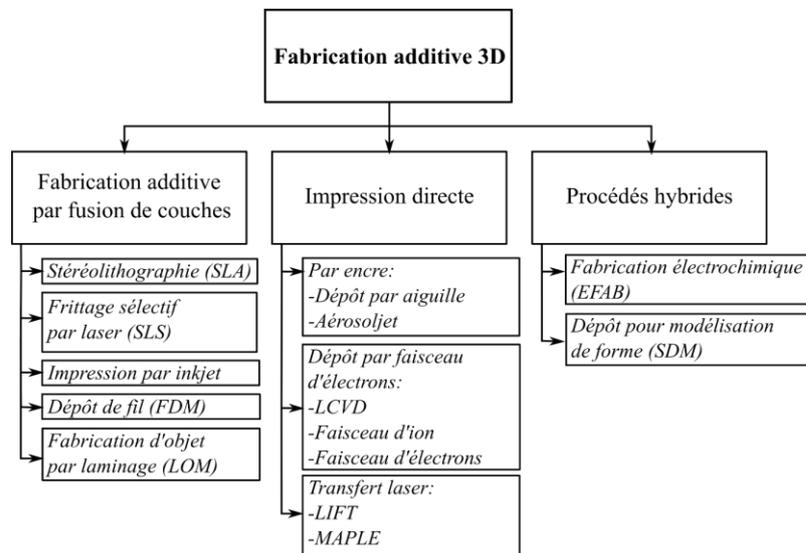


Figure I-20 : Classement des procédés de fabrication additive en 3D établi par Vaezi [108]

Dans la première famille de fabrication additive par fusion de couches se trouvent les procédés les plus connus de l'impression 3D tels que le dépôt de fil (FDM) ou la stéréolithographie. Des procédés à technologie de poudre sont présents tels que l'impression jet d'encre [109] ou le frittage sélectif laser (SLS) [110] qui permettent l'impression de petites et moyennes séries de pièces plastiques aux formes complexes. La fabrication par laminage (LOM) [111] permet de concevoir un objet 3D en collant entre elles des couches de matériau (plastique ou papier) par la chaleur ou la pression. Les différentes couches sont découpées par un laser dans un rouleau de matériau défilant en continu.

La seconde famille présentée est celle de l'impression directe. L'impression directe d'encre en est une sous-famille. Ces procédés consistent à déposer un matériau sur divers types de surface. Hon [21] propose une définition plus précise de l'impression directe qui permet de clairement la distinguer des autres techniques de prototypage rapide :

- La largeur des pistes s'étend de l'échelle du micromètre au millimètre
- Les matériaux déposés sont divers et incluent les métaux, céramiques et polymères ainsi que des matériaux biologiques.
- Le substrat est partie intégrante du produit final

Dans le classement de Vaezi, trois sous-familles de procédés sont présentées : l'impression directe d'encre, le transfert laser et le dépôt par faisceau d'électrons. Vaezi présente deux procédés pour l'IDE : la micro-dépose et l'aérosoljet. La deuxième sous-famille de procédés présentée dans ce classement est le transfert laser. Ces procédés utilisent l'énergie d'un laser afin d'éjecter un matériau solide ou liquide sur un substrat [112,113]. La dernière sous-famille de l'impression directe est le dépôt par faisceau de particules dont le procédé le plus connu est la dépose chimique en phase vapeur assisté par laser (LCVD) très utilisé en microélectronique. Ces procédés consistent à utiliser un laser ou un faisceau d'ions ou d'électrons afin d'exciter des particules de gaz qui généreront un dépôt sur le substrat.

La dernière famille de procédés additifs répertoriée par Vaezi concerne les procédés hybrides. Ces procédés sont une combinaison de procédés additifs et soustractifs. Les deux procédés présentés sont la fabrication électrochimique et le dépôt pour modélisation de forme. Le premier est généralement constitué de trois étapes chimiques qui peuvent être répétées : dépôt du métal sur le substrat, dépôt du matériau métallique sacrificiel puis un aplanissement. Le dépôt pour modélisation de forme consiste à imprimer un support pour l'objet puis à imprimer celui-ci et enfin à soustraire le support. Cette technique permet d'intégrer des composants cependant elle est très peu utilisée pour l'électronique.

La Figure I-21 ci-dessous est une classification modifiée intégrant plus spécifiquement les procédés plastroniques La classification de Vaezi intègre donc dans la famille « impression directe » les procédés d'impression d'encre de la plastronique. L'électronique moulée et la structuration laser directe trouvent leur place au sein des procédés hybrides.

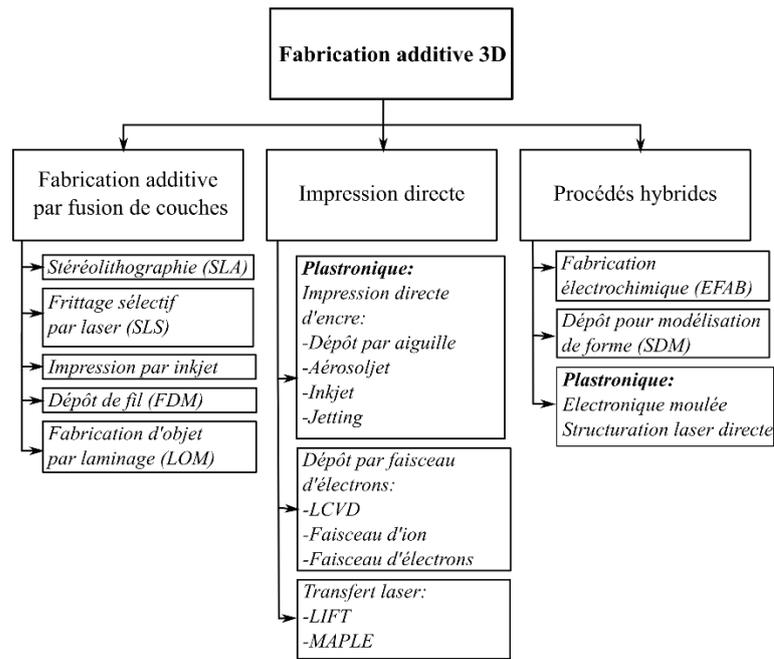


Figure I-21 : Positionnement des procédés plastroniques dans le classement des procédés de fabrication additive- classification de Vaezi complétée

I.2. Etat de l'art des dispositifs plastroniques

Une description complète des procédés plastroniques a été réalisée dans la partie précédente. Cette partie présente des applications radiofréquences (RF) réalisées en plastronique.

Les paramètres pertinents des systèmes radiofréquences sont explicités en Annexe A et Annexe B afin de comprendre les critères de comparaison des applications. Une synthèse de ces notions est réalisée dans le paragraphe I.2.1.

Les applications sont ensuite présentées en plusieurs catégories : les antennes, les lignes de transmission, les capteurs et les systèmes électroniques. Finalement, des perspectives d'applications pour la plastronique sont proposées.

I.2.1. Synthèse de notions théoriques pour l'analyse de dispositifs radiofréquences

Les paramètres S décrivent les transmissions et réflexions de l'onde électromagnétique traversant un dispositif (quadripôle), il en existe 4 : le S_{11} , S_{21} , tous deux liés au port 1 et S_{21} et S_{22} tous deux liés au port 2. Ceux-ci sont exprimés en décibels. Pour les dispositifs décrit dans ce travail seul les paramètres S_{11} et S_{21} lié au port 1 sont nécessaires. Le paramètre S_{11} ou coefficient de réflexions, traduit les réflexions qui ont lieu en fonction de la fréquence. Il est important que ce paramètre soit minimisé à la fréquence de résonance pour les antennes et sur la bande de fréquence pour les lignes de transmission. Le S_{21} traduit la transmission d'énergie réalisée, ainsi celui-ci doit être maximisé dans le cas des antennes à la fréquence de résonance et dans le cas des lignes de transmission sur une bande de fréquence.

L'adaptation d'un dispositif est réalisée lorsque l'impédance de ce dispositif et des dispositifs auxquels il est relié sont accordés, généralement cette valeur est de 50Ω . Lorsqu'il y a une bonne adaptation, cela signifie également que les réflexions sont minimisées, et donc que le paramètre S_{11} est minimisé aussi.

Le gain s'exprime en dBi et décrit la capacité d'amplification passive d'une antenne. L'efficacité ou le rendement de l'antenne est le rapport entre la résistance liée au rayonnement et la somme de cette résistance avec celle de la résistance liée aux pertes de l'antenne. Pour que l'antenne fonctionne au mieux, il faut minimiser la résistance liée aux pertes de l'antenne par rapport à celle liée au rayonnement. L'efficacité est exprimée en pourcentage. Ces deux caractéristiques doivent être maximisées pour les antennes.

Les caractéristiques du dispositif radiofréquence dépendent également du substrat sur lequel il est réalisé. Les paramètres impactant de celui-ci sur les caractéristiques du dispositif sont la permittivité relative (ϵ_r) et la tangente de pertes ($\tan\delta$). La permittivité relative est le rapport entre la permittivité du vide et la permittivité du milieu, et est donc sans unité. La tangente de pertes décrit les pertes liées au substrat, celle-ci doit être minimisée. Afin de situer les valeurs qui seront mentionnées dans cette partie, les caractéristiques des substrats FR4 et Rogers 4003 couramment utilisées en microélectronique, sont présentées dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Caractéristiques électromagnétiques des substrats FR4 et Rogers 4003 (fiches techniques des fournisseurs)

FR4		Rogers 4003C	
$\epsilon_r (-)$	$\tan\delta$ à 10 GHz	$\epsilon_r (-)$	$\tan\delta$ à 10 GHz
4,6±0,2	0,02	3,38±0,05	0,0027

Ces notions sont décrites en détails dans les Annexe A et Annexe B.

I.2.2. Antennes en plastronique

I.2.2.1. Performances d'antennes sur PCB

Dans cette partie, des antennes réalisées en technologie plastronique sont présentées. Afin de pouvoir comparer leurs performances, le Tableau 18 mentionne les caractéristiques d'antennes réalisées sur PCB. Ce tableau est utilisé comme référence pour les dispositifs plastroniques.

Tableau 18 : Exemples de performances d'antennes réalisées sur PCB

Références	Ning et al., 2020 [114]	Wang et al., 2016 [115]	Han et al., 2019 [116]
Applications	Wifi	Wifi and WiGig	5G
Fréquences (GHz)	2,45/5	2,4/5,2/5,8/60	28 et 39
Réflexion (S_{11})	<-10 dB	<-10 dB	<-10 dB
Gain (dBi)	2-5	6	@28 GHz 2,3 @39 GHz 4,8
Efficacité	70%-90%	-	-
Permittivité relative ϵ_r (-)	4,4	2,9	4,4
Tangente de pertes $\tan\delta$	0,002	0,01	-

I.2.2.2. Performances d'antennes plastroniques

Il est possible de réaliser divers types d'antennes en plastronique avec des performances prometteuses.

Une antenne cornet diélectrique est réalisée en technologie LDS (Figure I-22a) dans l'article [117]. Le substrat utilisé est du Xantar LDS 3730 avec $\epsilon_r=3$ and $\tan\delta=0,005$ à 3 GHz. L'antenne est alimentée par une ligne de transmission coplanaire. La mesure montre un gain de 6,4 dBi à 75,5 GHz. En se reportant au Tableau 18 contenant les résultats de mesure d'antennes réalisées sur PCB, l'antenne réalisée en LDS montre un gain plus élevé pour une fréquence plus haute.

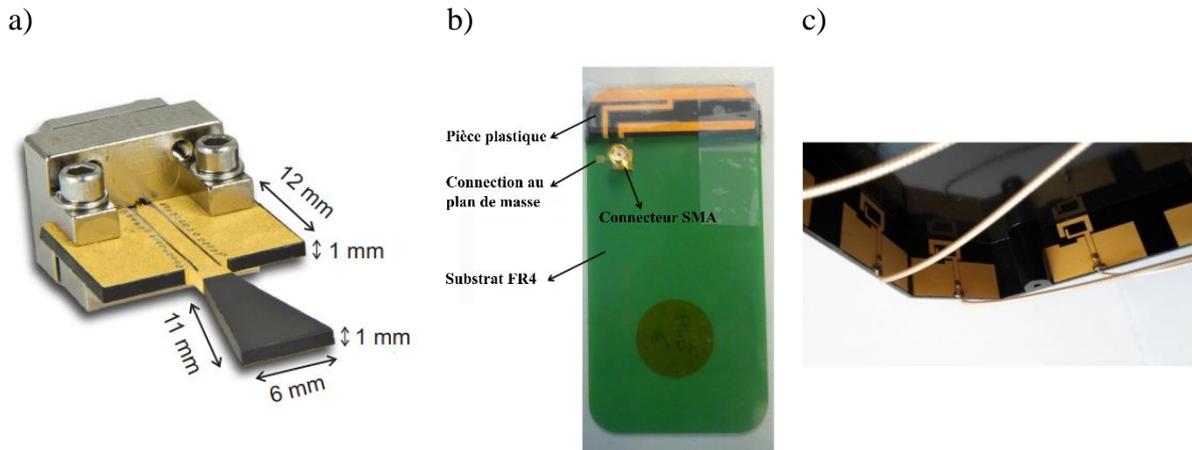


Figure I-22 : a) antenne cornet diélectrique [117] b) antenne GSM [118] c) réseau d'antenne [119] en technologie LDS

Une antenne GSM est réalisée en technologie LDS (Figure I-22b) dans l'article [118] sur un substrat plastique ($\epsilon_r=4,1$). Elle est ensuite connectée à un PCB avec deux connecteurs (pogopins). Les mesures montrent un paramètre S_{11} en dessous de -6 dB pour la bande de fréquence 700-900 MHz. L'efficacité sur cette bande de fréquence est de 55 à 70%, ce qui est proche de résultats obtenus sur FR4 dans le Tableau 18.

Une antenne MIMO (Multiple Input and Multiple Output) imprimée sur une boîte en 3 dimensions est réalisée dans l'article [119] (Figure I-22c). Un réseau de 8 antennes est fabriqué sur cette boîte en polycarbonate ($\epsilon_r=2,7$ et $\tan\delta=0,01$). Le gain moyen est de 6 dBi à la fréquence 2,45 GHz.

Dans [120] une antenne dual-bande LoRa (868 MHz et 1575 MHz) est imprimée sur un plastique simulant un boîtier plastique par technologie jetting, permettant ainsi d'utiliser plus de place sur le PCB pour l'antenne Wifi. Peu de différences sont mises en évidence entre l'antenne fabriquée sur PCB et l'antenne imprimée sur boîtier plastique : de -4 à -6,5 dBi à 1575 MHz et de -0,6 à -1,2 dBi à 868 MHz. Dans [121], une antenne monopole est réalisé sur du plastique PC-ABS et présente un gain maximum de 4,2 dB sur la bande de fréquence 3 à 13 GHz. Cela met en évidence le potentiel des antennes imprimées sur boîtier plastique.

Les tags RFID sont une application pertinente pour l'IDE. Ces dispositifs RF permettent l'identification d'objet sur des lignes de production ou en service après-vente par exemple. La technologie IDE permet alors d'imprimer directement sur l'objet à identifier et quelle que soit la forme de la surface. Dans l'article [76] un rétroviseur de voiture identifié par un tag RFID est présenté comme montré en Figure I-23a). La distance de lecture est de 8,9 m. D'après les auteurs, ce résultat est comparable aux résultats obtenus avec des tags RFID réalisés classiquement en lithographie.

Dans [122] une antenne est imprimée sur une demi-sphère de verre (diamètre 12,7 mm) par micro-dépose (Figure I-23b). La largeur des lignes imprimées est de 160 μm , l'épaisseur est de 30 μm , et un interligne de 520 μm . Les auteurs recommandent pour des surfaces sphériques de maintenir l'aiguille perpendiculairement à la surface. L'efficacité mesurée de l'antenne est entre 68 et 72 %, ce qui est proche de résultats obtenus sur FR4 (voir le Tableau 18).

a)



b)

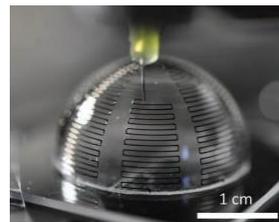


Figure I-23 : a) Rétroviseur identifié par RFID imprimé [76] b) Antenne imprimée sur une demi sphère [122]R

I.2.3. Lignes de transmission en plastronique

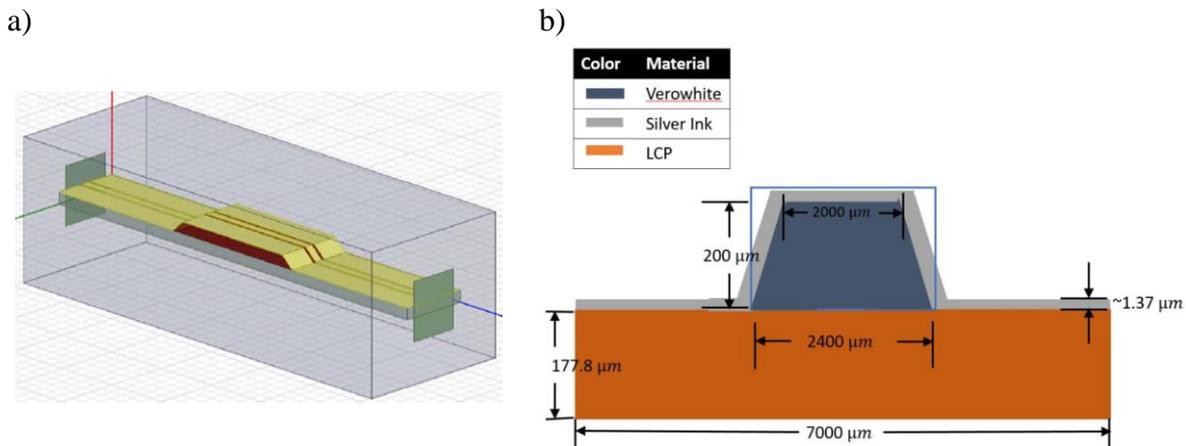
Les lignes de transmissions sont des structures utilisées pour amener la source vers une antenne par exemple. Elles sont caractérisées par la méthode des paramètres S (résumée dans le paragraphe I.2.2 et détaillée dans l'Annexe A) afin de mesurer leur capacité à transmettre le signal en fonction de la fréquence. Il existe différentes structures de lignes de transmission, quelques exemples sont présentés en Annexe C. Le coefficient d'atténuation (α) d'une ligne de transmission doit être minimisé pour transmettre au mieux le signal. Ces lignes de transmission permettent également d'évaluer les performances des dispositifs imprimés en fonction de la fréquence.

Dans [123] plusieurs couples de substrat/métal sont mesurés pour comparer leur coefficient d'atténuation à 5 GHz. Les substrats appelés Prototherm sont imprimés en 3D en stéréolithographie. Les lignes de transmission en cuivre sur Rogers ou FR4 servent de références à l'étude. Les lignes de transmission en argent sont imprimées en micro-dépose. Les mesures sont réalisées sur une ligne de transmission micro-ruban (voir Annexe C) avec une adaptation entre 52 et 60 Ω mesurée. Il est rare d'obtenir une adaptation à 50 Ω , l'écart est acceptable. Le coefficient d'atténuation augmente avec les pertes du substrat et du métal.

Tableau 19 : Coefficient d'atténuation α , résistivité et tangente de perte à 5 GHz mesurés en fonction du couple substrat/métal [123]

Métal/Substrat	α (dB/mm)	Résistivité ($\mu\Omega.cm$)	$\tan\delta$
Cuivre/Rogers	0,007	1,68	0,0012
Argent/Rogers	0,008	435	0,0012
Cuivre/Prototherm	0,024	1,68	0,03
Argent/Prototherm	0,038	435	0,03
Cuivre/FR4	0,019	1,68	0,023

Dans [124] la mesure des lignes de transmission coplanaires (voir Annexe C) est réalisée à haute fréquence, jusqu'à 110 GHz. Les lignes de transmission coplanaires sont imprimées par aérosoljet sur des structures trapézoïdes comme à la surface de packaging de composants. La structure de ces lignes de transmission est montrée en Figure I-24. Elles sont imprimées avec de l'encre argent à nanoparticules sur substrats d'impression 3D : Verowhite et LCP (*Liquid Crystal Polymer*). L'épaisseur déposée est de 1,37 μm . Le coefficient de réflexion est de -18 dB et les pertes sont de 0,38 dB/mm pour 110 GHz. Cet article montre des capacités prometteuses de la technologie IDE à haute fréquence.



Dans [121] des lignes de transmission coplanaires en technologie LDS sont réalisées sur un substrat LCP Vectra E820i. Les dimensions sont calculées pour obtenir une adaptation à 50 Ω . Le coefficient de réflexion est inférieur à -15 dB jusqu'à 3,5 GHz et correspond aux résultats de simulation. Les substrats utilisés montrent de faibles pertes ($\tan\delta=0,004$) et permettent d'obtenir de bons résultats pour des applications radiofréquences.



Figure I-25 : Lignes coplanaires réalisées en technologie LDS [121]

Avec les technologies IDE, les plans de masse imprimés peuvent être consommateurs en temps et en encre. Dans l'article [125], les auteurs ont explorés la possibilité de mailler les plans de masse plutôt que de les imprimer entièrement (Figure I-26a)). Le substrat ABS est imprimé en 3D FDM, le dépôt d'encre métallique est réalisé en micro-dépose.

La mesure de la transmission est réalisée sur des lignes de transmission avec des plans de masse pleins et maillés (Figure I-26b)). Les plans de masse présentent les dimensions suivantes : $w=1,65$ mm, $s=200$ μm et de longueur $l=10$ mm et g est variable de 0,99 mm à 4,6 mm. Les plans de masse maillés présentent les dimensions suivantes : $b=0,25$ mm, $g=4,65$ mm et a varie de 0,52 mm à 0,93 mm. Pour un plan de masse plein avec $g=4,6$ et un plan de masse maillé avec $a=0,52$, la transmission est similaire.

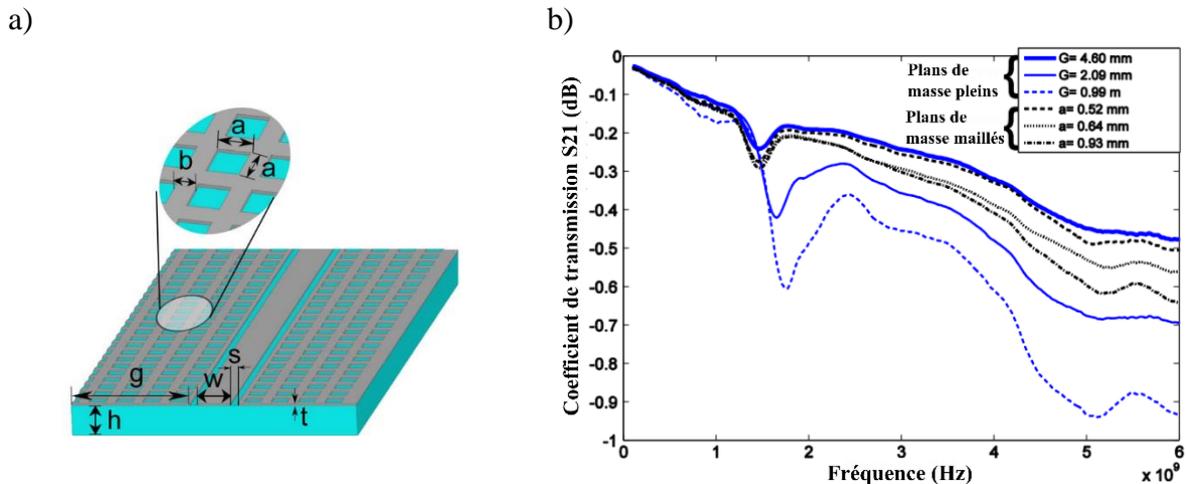


Figure I-26 : a) Géométrie de la ligne de transmission maillée [125] b) Coefficient de transmission en fonction de la fréquence des lignes à plans de masse maillés et pleins [125]

L'auteur a également étudié l'évolution du coefficient d'atténuation en fonction de la taille de la maille comme présenté en Figure I-27 ($1 \text{ Np}=8,69$ dB). Lorsque la maille est agrandie les pertes sont plus importantes. Pour une densité de maillage de 54,4%, le coefficient d'atténuation augmente de 9,3% en comparaison avec une ligne à plans de masse pleins. Cela permet alors de gagner en temps de réalisation et de limiter les dépenses d'encre avec un impact faible sur le coefficient d'atténuation.

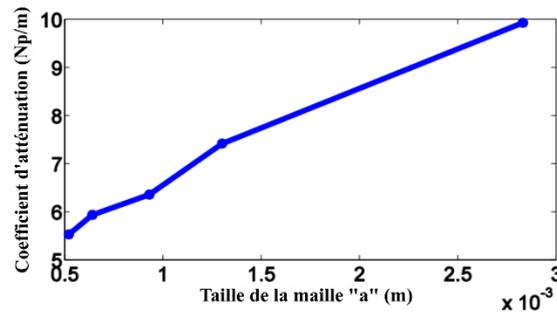


Figure I-27 : Evolution du coefficient d'atténuation en fonction de la taille de la maille [125] ($1 N_p=8,69$ dB)

En utilisant cette méthode de maillage, dans [126] les auteurs ont réalisé un filtre passe-bande centré sur 3 GHz avec une bande passante de 2 GHz sur substrat Rogers 5880. Afin de pouvoir comparer les résultats, ce filtre a été réalisé en cuivre maillé et non maillé par gravure (Figure I-28). Le filtre maillé montre 22% de pertes supplémentaires par rapport au filtre non maillé, malgré 65% de métal en moins.

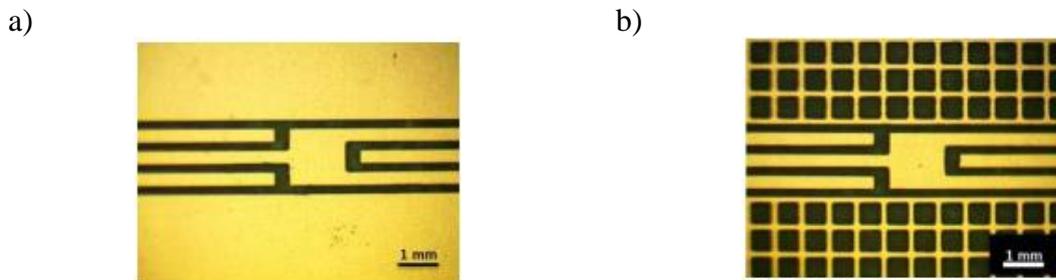


Figure I-28 : a) filtre en cuivre b) filtre maillé en cuivre [126]

I.2.4. Capteurs en plastroniques

Un capteur est un dispositif permettant de transformer une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. Les capteurs sont caractérisés par leur sensibilité, leur reproductibilité, leur précision, leur temps de réponse et leur gamme de mesure. Avec les technologies plastroniques il est possible de les intégrer directement sur des objets.

Dans [127] un capteur de type jauges de déformation est imprimé. Il consiste à mesurer la variation de résistance lors de la déformation d'une ligne conductrice, dans le but d'en déduire la force (en N) appliquée sur la pièce. La variation de résistance est calculée par la formule suivante :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = G_e \varepsilon_l \quad (I.7)$$

Avec :

- R_0 est la valeur de la résistance initiale (Ω)
- ΔR est la différence entre la résistance initiale et la résistance à la déformation (Ω)
- G_e le facteur de gauge (sans unité)
- ε_l est le facteur d'allongement (sans unité) : $\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L_0}$

Une piste est imprimée en technologie jet d'encre avec une encre PEDOT sur une résine imprimée en 3D (Figure I-29a)). Une sensibilité de $0,98\% N^{-1}$, une répétabilité de 1,9%, une précision de 5,3% et une gamme de mesure de 0 à 600 mN. Ces résultats montrent le potentiel des technologies plastroniques pour la fabrication de capteurs, cependant en utilisant la technologie de jet d'encre 8 couches d'encre sont nécessaires pour imprimer la jauge ce qui peut être limitant pour un procédé industriel.

Dans l'article [79], le capteur de force intégré est à l'intérieur du substrat (Figure I-29b)). Le capteur est imprimé en technologie aérosoljet sur un film en PTFE ou PFA. L'impression 3D du substrat en résine transparente est mise en pause à la moitié afin de pouvoir intégrer le film sur lequel le capteur est imprimé. Celui-ci est ensuite recouvert par la deuxième moitié du substrat. Le facteur de gauge est mesuré à $11,4 \pm 0,06$ lors d'une extension de 4%. D'après les auteurs, ce facteur est deux fois plus élevé que celui de capteurs de force à feuille métallique commercialisés.

Dans l'article [128], un capteur d'ammoniaque et de DMMP (diméthyl méthylphosphonate) est réalisé. Le capteur est imprimé par la technologie jet d'encre sur du polyimide Kapton. La sensibilité pour la détection d'ammoniaque est de 2,8% pour 10 ppm et 2,1% pour 10 ppm, le temps de réponse est de 20 min. D'après les auteurs le temps de réponse est similaire aux détecteurs de gaz commerciaux. Selon eux, la sensibilité obtenue est la meilleure obtenue pour un détecteur de gaz imprimé par jet d'encre.

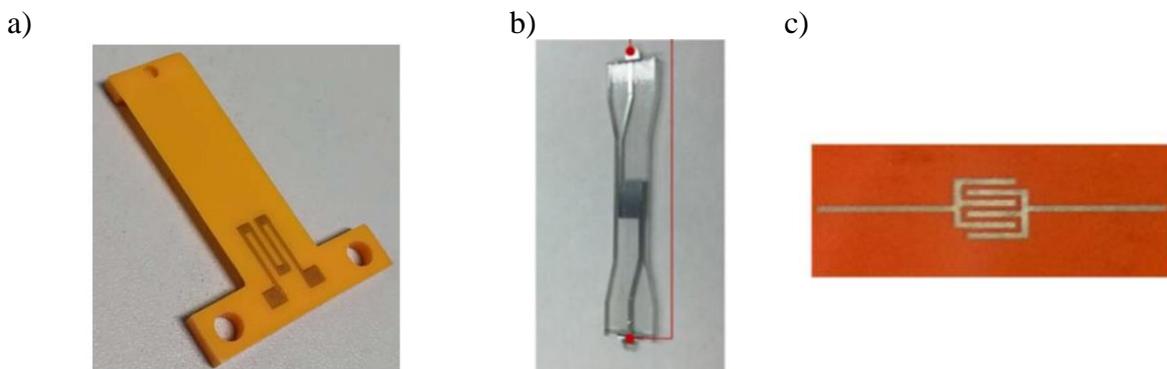


Figure I-29 : a) Jauge de déformation imprimée en jet d'encre [127] b) Capteur de force intégré imprimé en aérosoljet [79] c) Capteur de gaz imprimé en jet d'encre [128]

La plastronique permet également une intégration de capteurs dans des objets de formes diverses. Dans l'article [5] un capteur de toucher est réalisé en technologie LDS pour des applications robotiques ou pour réaliser des prothèses de main. L'objectif est de concevoir un capteur sensible, miniaturisé et de la forme d'un doigt (Figure I-30a)). Les mesures montrent une bonne répétabilité et une détection précise : $0,03 N/cm^2$. Cela permet alors d'être en mesure d'intégrer ce capteur sur un bras robotique et sur des prothèses de mains afin de transmettre la sensation de toucher.

L'électronique moulée est déjà utilisée pour l'intégration de capteurs directement dans le tableau de bord d'automobiles. En Figure I-30b) un exemple de bouton intégré dans un tableau de bord de voiture réalisé par l'entreprise Tactotek est présenté.

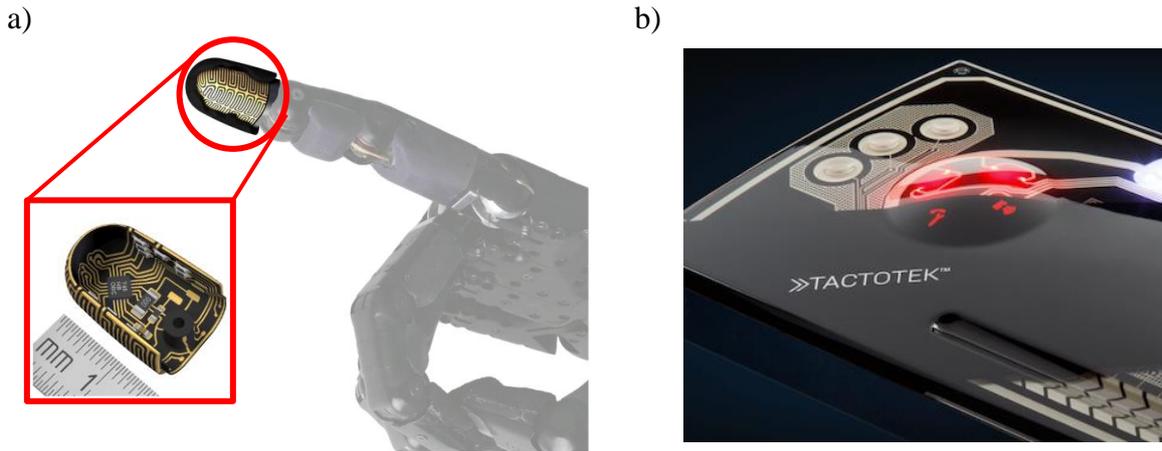


Figure I-30 : a) Capteur de toucher en LDS [5] b) Boutons intégrés dans le tableau de bord de l'automobile (tactotek.com)

I.2.5. Systèmes électroniques en plastronique

Des systèmes électroniques complets peuvent être réalisés en technologie plastronique. Ces systèmes complexes sont des dispositifs contenant des composants qui peuvent être imprimés ou bien reliés par des pistes. Le système le plus complet dans la littérature est présenté en Figure I-31. Ce dé [6] éclaire sa face supérieure après avoir été lancé. Il est entièrement réalisé en technologie additive : le substrat est imprimé en 3D (stéréolithographie), les composants (microprocesseur, accéléromètre, batterie et led) sont reliés par des pistes imprimées en technologie de micro-dépose. Chaque face mesure 19 mm de longueur et largeur. Des tranchées de largeur $560 \mu\text{m}$ sont utilisées afin de pouvoir être plus précis pour l'impression de ligne conductrice.

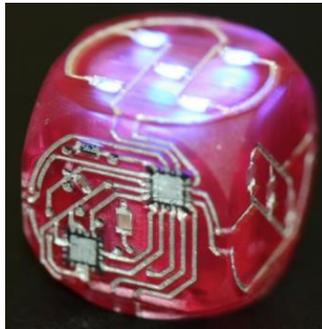
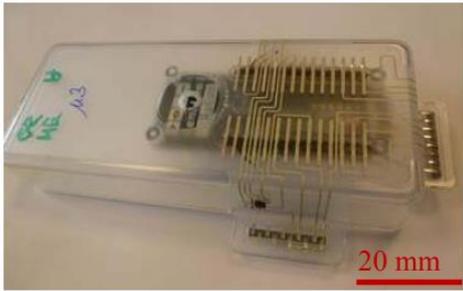


Figure I-31 : Système complexe d'électronique intégrée dans un dé [6]

La plastronique permet également de rendre des boîtiers intelligents. Sur la Figure I-32a) des boîtiers intelligents fabriqués en électronique moulée sont présentés [18]. Les pistes sont imprimées avec un aérosoljet et de la sérigraphie sur un film PET. Ensuite, le substrat est thermoformé dans une presse et moulé avec du polycarbonate. L'épaisseur du boîtier est de 1,6 mm. Un microcontrôleur arduino est connecté aux capteurs de température, humidité et lumière, et est capable d'envoyer les informations sur une application. Ce boîtier peut être utilisé dans l'industrie agroalimentaire ou dans la domotique.

a)



b)

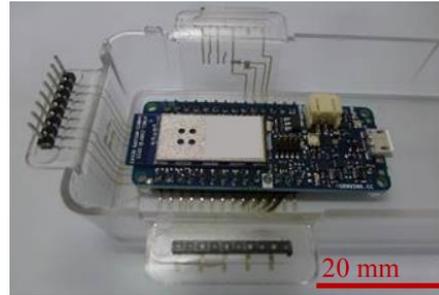
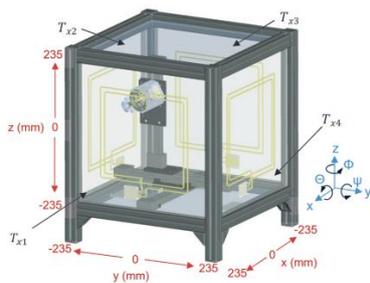


Figure I-32 : Boîtier intelligent réalisé en électronique moulée [18] a) vue de dessous b) vue de dessus

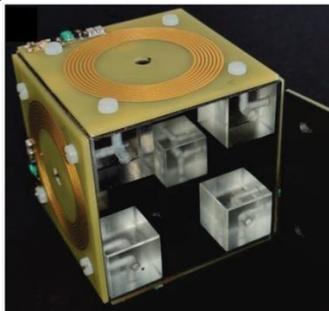
Dans la thèse [10] une enceinte pour la recharge de batterie sans fil a été réalisée, à destination d'objets munis d'antennes réceptrices et placées à l'intérieur de cette enceinte. Les inductances émettrices sont positionnées sur 4 côtés de l'enceinte (cube) comme montré en Figure I-33a). Des inductances réceptrices sont réalisées dans un premier temps sur PCB puis en technologie LDS, permettant par sa forme une optimisation de la récupération d'énergie (Figure I-33b) et c)). Lorsque le système récepteur est placé dans l'enceinte, le phénomène de couplage permet un transfert d'énergie entre les deux dispositifs. Ces dispositifs peuvent être utilisés dans le cas de recharge d'appareils à distance ou même d'appareils implantés dans le corps humain tels que des pacemakers par exemple.

Les inductances émettrices sont alimentées par des amplificateurs de type classe D fonctionnant à 6,78 MHz. Avec une résistance de 272Ω , une tension $V_{in}=3,5 \text{ V}$ et le récepteur placé au centre de la boîte, la puissance de sortie est de 4,33 W avec un rendement de 16%. Le couplage est 2,5 fois plus faible avec le dispositif plastronique qu'avec le dispositif sur PCB, cependant une liberté plus importante de forme est possible.

a)



b)



c)



Figure I-33 : a) Inductance émettrice b) inductance réceptrice sur PCB c) Inductance réceptrice réalisée en technologie LDS [10]

I.2.6. Perspectives d'applications pour la plastronique

Outre les domaines d'applications déjà présentés, certains domaines n'ont pas encore été abordés dans la littérature et pourraient être prometteurs car utilisent pleinement les capacités de la plastronique dans des secteurs innovants.

Les surfaces sélectives en fréquence (*Frequency Selective Surfaces* ou FSS) sont des structures 2D avec des motifs périodiques se comportant comme des filtres pour les ondes

électromagnétiques [129]. Ces motifs peuvent également être utilisés pour ajouter ou modifier les propriétés des antennes [130,131]. Ainsi, il peut être intéressant de réaliser des FSS sur des radômes (radar & dôme) qui sont des abris pour protéger l'antenne de son environnement comme montré en Figure I-34. La technologie IDE permettrait d'imprimer directement les motifs pour réaliser des FSS sur des radômes existants.

a)



b)



Figure I-34 : a) Antenne dans un radôme (lalanguefrançaise.com) b) Antenne wifi avec radôme, diamètre de 40 cm(wifi-france.com)

La récupération d'énergie radiofréquence consiste à récupérer les ondes électromagnétiques ambiantes à une certaine fréquence afin de les convertir en courant grâce à une rectenna (*rectifier & antenna*). Une rectenna est constituée d'une antenne qui reçoit les ondes et d'un circuit de redressement afin de pouvoir récupérer un courant exploitable. La puissance récupérée est faible ($10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ à 1,8 et 2,4 GHz dans [132]) mais suffisante pour alimenter certains capteurs ce qui leur permettrait d'être autonomes sans batterie [133–135]. Sur la Figure I-35, deux exemples de rectennas sont présentés : une rectenna imprimé par sérigraphie et une rectenna réalisée par gravure.

a)



b)

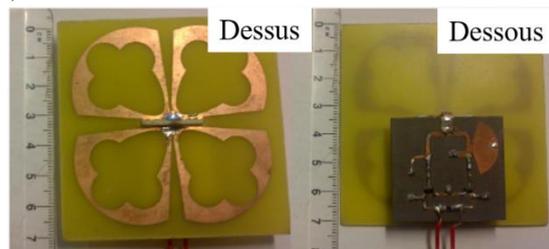


Figure I-35 : a) Rectenna triple bande (900 MHz, 1800 MHz et 2100 MHz) imprimée par sérigraphie puis pliée (origami) [135] b) Rectenna pour les fréquences allant de 1,8 GHz à 2,5 GHz, le circuit de redressement est visible dessous [136]

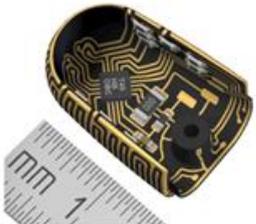
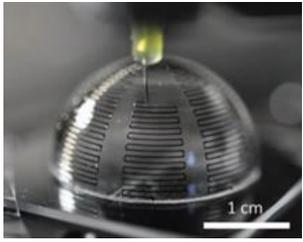
Avec des techniques plastroniques, il est possible de réaliser des rectennas sur diverses surfaces d'objets 3D et d'intégrer des capteurs autonomes sans batterie.

I.3. Conclusion

La plastronique permet d'intégrer des dispositifs radiofréquences, des capteurs et des systèmes électroniques sur toutes formes d'objets. Trois procédés majeurs permettent de réaliser des produits plastroniques, le Tableau 20 propose une synthèse de leurs caractéristiques. La notion de TRL (Technology Readiness Level) est utilisée et désigne leur degré de maturité :

- Recherche : TRL 1 à 3 mène à des preuves de concept
- Développement : TRL 4 à 6 mène à des démonstrateurs
- Pré-industrialisation : TRL 7 à 9 mène à une validation industrielle

Tableau 20 : Synthèse des technologies plastroniques

	<i>Structuration laser directe</i>	<i>Electronique moulée</i>	<i>Impression directe d'encre</i>
TRL	9	5-7	4
Coût	Elevé	Elevé (moins couteuse pour de très grandes séries)	Faible
Résolution	-Epaisseur de métal : 2-10 μm -Largeur de métal minimal : 150 μm	-Epaisseur de métal : 8-12 μm -Largeur de métal minimal : 60 μm	-Epaisseur de métal : 0,5-75 μm -Largeur de métal minimal : 13-1025 μm
Avantages	-Flexibilité pour changement de forme du circuit -Grandes séries possibles -Forme 3D complexe	-Processus rapide -Electronique protégée de l'environnement	-Large possibilité de substrats standards -Simplicité de mise en œuvre -Simplicité de mise en œuvre -Possibilité de personnalisation, d'objet unique -Peu d'étapes de production -Implémentation en milieu industriel possible et à fort potentiel
Limites	-Nécessité de substrat plastique additivés -Déformation du substrat après passage du laser	-Faible flexibilité -Choix de matériau limité et les polymères doivent être compatibles -Déformation des motifs imprimés après injection	-Recuit in situ -Distance de la tête d'impression par rapport au support (compromis)
Exemple de réalisation			

La technologie LDS est commercialisée mais présente des limitations. L'électronique moulée est utilisée par exemple pour l'automobile et permet d'intégrer des capteurs directement dans le tableau de bord en apportant un esthétisme recherché par les constructeurs. Les technologies IDE sont principalement utilisées en recherche. Parmi celles-ci, le jetting est peu

utilisé malgré des possibilités intéressantes pour l'impression sur des formes 3D. En effet, un dépôt présentant des performances électriques suffisantes peut être réalisé en une seule couche.

Les technologies présentées sont celles qui ont dépassé le statut de preuves de concept cependant il existe également d'autres technologies plastroniques en cours de développement tel que le micro-tamponnage 3D [101].

Cette thèse porte sur le développement d'une technologie IDE qui est en rupture par rapport aux technologies existantes : la technologie jetting positionnée sur un bras robotisé. Cette technologie offre de nombreux avantages pour l'impression sur des surfaces 3D de formes variées. Les développements en milieu industriel sont un enjeu majeur, c'est pourquoi les outils et les matériaux mis en œuvre dans la suite de la thèse sont des éléments industriels et commercialisés.

Dans un premier temps, les paramètres du système d'impression sont définis pour obtenir une impression robuste. Les lignes conductrices obtenues sont caractérisées et des stratégies d'impression avec le robot 6 axes sont proposées afin d'améliorer la qualité des impressions. A l'aide des caractérisations réalisées, dans un deuxième temps, des dispositifs radiofréquences en 2D et en 3D peuvent être simulés, réalisés et mesurés.

Chapitre II: Développement des méthodes d'impression

II.1.	PRINCIPE DE L'IMPRESSION PAR JETTING	58
II.1.1.	<i>Description de la tête d'impression jetting</i>	58
II.1.2.	<i>Les paramètres temporels de la tête d'impression</i>	59
II.1.3.	<i>Superpositions des gouttes</i>	60
II.2.	CARACTERISTIQUES DES SUBSTRATS	61
II.3.	MISE EN ŒUVRE D'UNE ENCRE CONDUCTRICE	62
II.3.1.	<i>Caractéristiques de l'encre</i>	62
II.3.2.	<i>Post-traitement de l'encre : le recuit</i>	68
II.4.	MONTAGE DU SYSTEME D'IMPRESSION SUR ROBOT	68
II.4.1.	<i>Système jetting sur robot 4 axes</i>	68
II.4.2.	<i>Système jetting sur robot 6 axes</i>	71
II.5.	OPTIMISATION DU PROCEDE D'IMPRESSION	76
II.5.1.	<i>Optimisation des paramètres temporels de la tête d'impression.....</i>	76
II.5.2.	<i>Stratégies dynamiques d'impression pour améliorer la qualité des pistes imprimés.....</i>	98
II.6.	CONCLUSION	104

Dans le cadre de la Chaire MINT, plusieurs techniques ont été investiguées, pour imprimer sur des objets thermoplastiques 2D et 3D : des systèmes permettant la dépose de cordons - vis sans fin (Ecopen) et vanne électropneumatique (Nordson) – et un système permettant la dépose de gouttes – tête de jetting piézoélectrique, (Vermes) (Figure II-1).

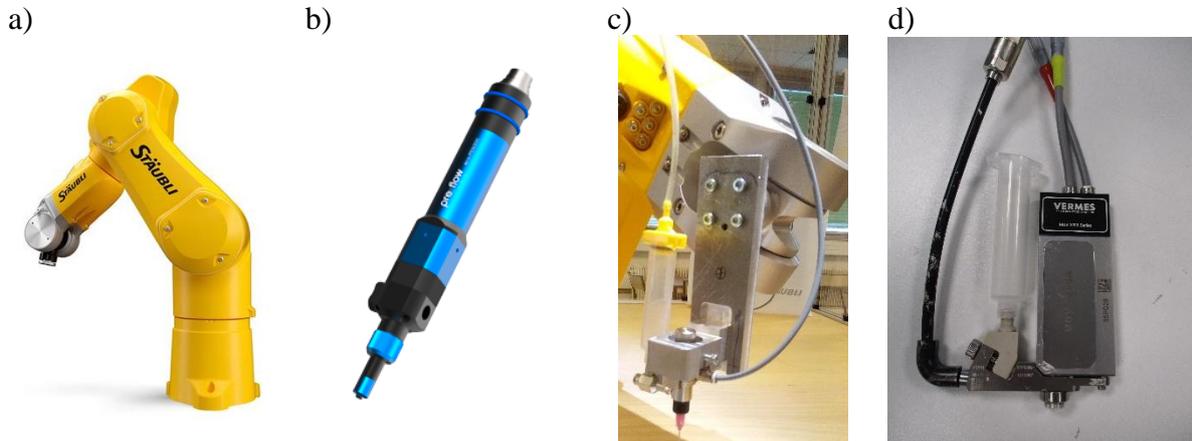


Figure II-1 : a) Robot 6 axes Staibli b) Système d'impression Ecopen c) Système d'impression Nordson d) Système d'impression Vermes

Dans cette thèse, le système de dépose Vermes [137] est étudié en détail. Cette technique permet d'imprimer à une distance plus importante du support que la micro-dépose. En effet, les têtes d'impression Ecopen et Nordson imposent une distance au support de l'ordre du diamètre de l'aiguille, soit une à deux centaines de micromètres, alors que la tête Vermes autorise une distance qui peut être supérieure au millimètre. Cela permet d'être plus compatible avec des substrats en plastique injecté qui présentent parfois des variations de dimensions d'une pièce à l'autre. Cette technologie est donc une solution compatible avec l'orientation du procédé vers l'industrie.

Ce chapitre a pour but d'établir les paramètres optimaux pour pouvoir imprimer une encre visqueuse sur un substrat plastique. Des optimisations seront également proposées pour l'impression de lignes et aplats constituant les dispositifs électroniques et radiofréquences.

Après avoir présenté le principe de l'impression par jetting, la dynamique du procédé, c'est-à-dire la mise en mouvement du système d'impression par le robot, sera expliquée avec le montage sur robot 4 et 6 axes puis l'optimisation de l'ensemble du procédé sera étudiée : les paramètres temporels de l'impression par jetting, la trajectoire du robot et la coordination du robot et de la tête d'impression.

II.1. Principe de l'impression par jetting

Dans cette partie, les paramètres d'ajustement de la tête d'impression Vermes qui fonctionne le principe de jetting sont détaillés. La compréhension fine du fonctionnement de la tête et de l'influence de chacun des paramètres variables permet la maîtrise de l'impression.

II.1.1. Description de la tête d'impression jetting

L'impression d'encre conductrice par jetting est réalisée sans contact. Cette technologie est dédiée aux encres à faible et haute viscosité (1-100'000 mPa.s) [91]. Ce procédé éjecte des

gouttes d'encre à une fréquence élevée (jusqu'à 3000 Hz) grâce à un actionneur piezoélectrique qui active le piston. Sur la Figure II-2 le schéma de principe du système jetting et une photographie du système Vermes sont représentés. L'encombrement est de 118,5x82x12 mm pour 375 g [137]. Ce dispositif est utilisé tout au long de ce travail. L'encre est contenue dans la seringue pressurisée (4 à 5 bars) pour favoriser l'écoulement d'encre visqueuse. Elle s'écoule à travers le canal de fluide jusqu'à la buse lorsque le piston est relevé. Lorsque le piston se ferme à une vitesse importante, le fluide contenu au niveau de la buse est éjecté sous forme de goutte en direction du support. La course du piston est réglable et est au maximum de 3 mm. Différents diamètres de buse peuvent être utilisés de 50 μm à 400 μm .

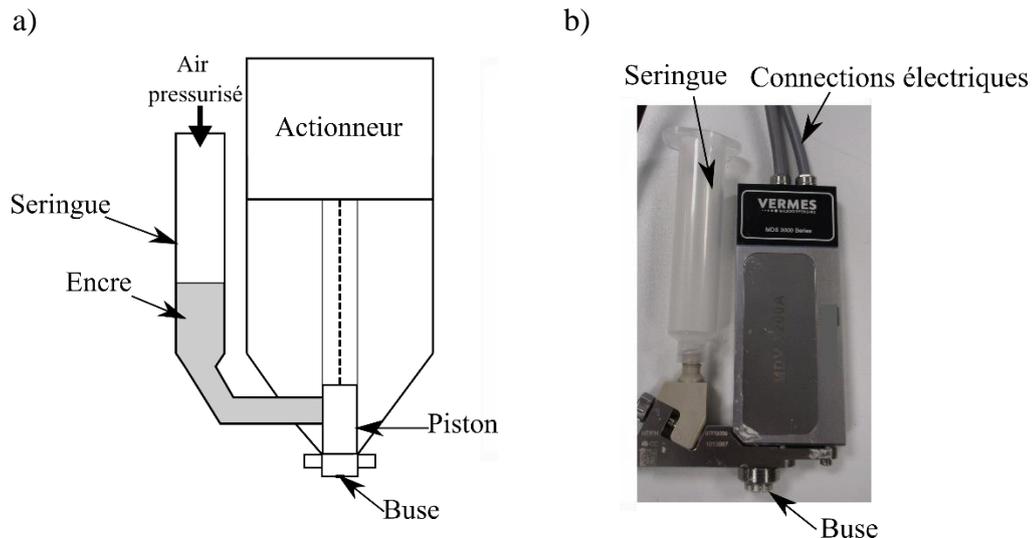


Figure II-2 : a) Schéma de principe du système jetting. b) Photographie de la valve jetting Vermes MDV 3200A

II.1.2. Les paramètres temporels de la tête d'impression

Les paramètres de temps gérant les mouvements du piston peuvent être ajustés précisément grâce à un contrôleur associé. Sur la Figure II-3, la liste des paramètres ajustables est représentée.

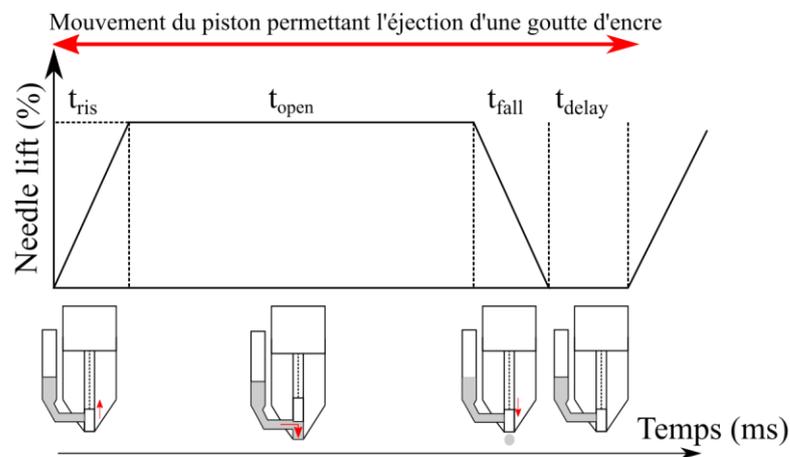


Figure II-3 : Schématisation des paramètres ajustables au cours du mouvement du piston

- Needle lift (NL) est l'amplitude d'ouverture du piston en pourcentage

- t_{ris} est l'intervalle de temps (ms) durant lequel le piston s'élève jusqu'à l'ouverture NL programmée
- t_{open} est l'intervalle de temps (ms) où le piston reste ouvert et où l'encre s'écoule jusqu'à la buse
- t_{fall} est le temps de descente (ms) du piston (jusqu'à la fermeture) qui permet l'éjection du volume d'encre accumulé au niveau de la buse
- t_{delay} est le temps d'attente (ms) jusqu'au départ du mouvement suivant

Les gammes possibles de ces temps données par le constructeur sont reportées dans l'Annexe D.

t_{ris} , t_{open} et t_{fall} sont ajustés en fonction du comportement rhéologique de l'encre. Le diamètre de la buse peut également être modifié (de 50 μm à 400 μm), dans cette étude le diamètre sera toujours de 100 μm .

II.1.3. Superpositions des gouttes

La tête d'impression Vermes se déplaçant à vitesse constante v_{print} à la surface du substrat, t_{delay} est une variable qui permet de former des gouttes indépendantes jusqu'à des lignes continues par la superposition de gouttes. Deux types de superposition sont représentée Figure II-4 et définies comme :

- La superposition dans le sens d'impression (longitudinal, indice L) permet de former une ligne continue, celle-ci sera nommée OL_L .
- La superposition perpendiculaire au sens d'impression (transversal, indice W) permet d'élargir une ligne déjà existante, celle-ci sera nommée OL_W .

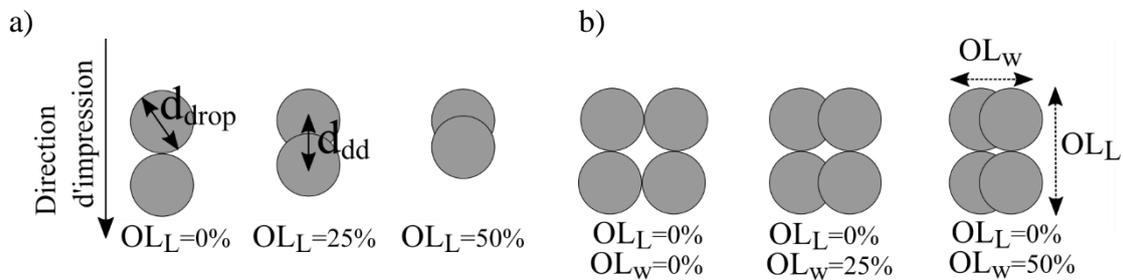


Figure II-4 : a) Superposition des gouttes dans la direction d'impression (OL_L). b) Superposition des gouttes dans la direction perpendiculaire à la direction d'impression (OL_W).

OL_L dépend de la vitesse d'impression (i.e. la vitesse de déplacement de la tête d'impression à la surface du support), de la fréquence d'éjection des gouttes et du diamètre des gouttes (d_{drop}) obtenu une fois la goutte déposée sur le support. La fréquence d'éjection des gouttes est modulée par t_{delay} , t_{open} , t_{ris} et t_{fall} , mais cependant t_{open} , t_{ris} et t_{fall} seront finalement constants et seul t_{delay} permettra de faire varier la fréquence d'éjection. La vitesse d'impression (v_{print}) est un paramètre déterminé par le robot. Les équations suivantes permettent de calculer, respectivement, t_{delay} (ms) et la distance entre deux gouttes éjectées (d_{dd} en mm) :

$$t_{delay} = \frac{d_{drop} \cdot (1 - OL_L)}{v_{print}} - (t_{ris} + t_{open} + t_{fall}) \quad (II.1)$$

$$d_{dd} = (t_{ris} + t_{open} + t_{fall} + t_{delay}) \cdot v_{print} \quad (II.2)$$

Avec :

- t_{delay} , t_{open} , t_{ris} et t_{fall} en s
- d_{drop} et d_{dd} en mm
- v_{print} en mm/s

La superposition des gouttes dans la direction perpendiculaire à la direction d'impression, OL_w , est gérée par la trajectoire du robot qui permet de superposer deux lignes de gouttes à la distance voulue comme montré en Figure II-4b).

II.2. Caractéristiques des substrats

La connaissance des caractéristiques mécaniques des substrats est importante pour l'impression et le post-traitement qui soumet le substrat à une élévation de température pouvant être néfaste pour le substrat.

Dans le domaine de la plastronique, il existe 3 groupes de polymères généralement utilisés :

- Les polymères thermodurcissables : une élévation de température crée une déformation irréversible du matériau qui devient infusible et insoluble.
- Les polymères élastomères : ils présentent des propriétés élastiques obtenues après réticulation, leur température de transition vitreuse (T_v) est très basse (souvent inférieur à -40°C)
- Les polymères thermoplastiques : lorsque la T_v est dépassée le matériau se déforme

Le Tableau 21 montre les températures de transition vitreuse de substrat plastique. Le choix du plastique en tant substrat est motivé par son coût et ses propriétés mécaniques.

Tableau 21 : Température de transition vitreuse (T_v) et coût de substrats plastiques [25,26]

	PET <i>Poly(éthylène téréphtalate)</i>	PEN <i>Poly(naphtalate d'éthylène)</i>	PC <i>Polycarbonate</i>	PI <i>Polyimide</i>
T_v ($^\circ\text{C}$)	70	120	150	360
Coût (cent/dm²) [26]	2	3,5	-	30

Dans cette thèse un substrat thermoplastique PC+ABS (polycarbonate et acrylonitrile butadiène styrène) fourni par Schneider Electric sera utilisé. Celui-ci se présente sous forme de plaque de 3 mm d'épaisseur et de surface 40x40 mm²

Il est important de connaître la température de transition vitreuse du substrat, afin de ne pas la dépasser lors du post-traitement car cela pourrait entraîner des détériorations du support. Pour cela une analyse de calorimétrie à balayage différentielle (DSC) est utilisée. Le principe de l'essai est de mesurer le flux de chaleur entre l'équipement et l'échantillon, ce qui permet

d'identifier le point de transition d'état car cette réaction est endothermique ou exothermique. Pour la température de transition vitreuse, une réaction endothermique est attendue comme montré sur le graphique en Figure II-5. La température de transition vitreuse est de 144°C pour le PC+ABS utilisé tout au long de ce travail.

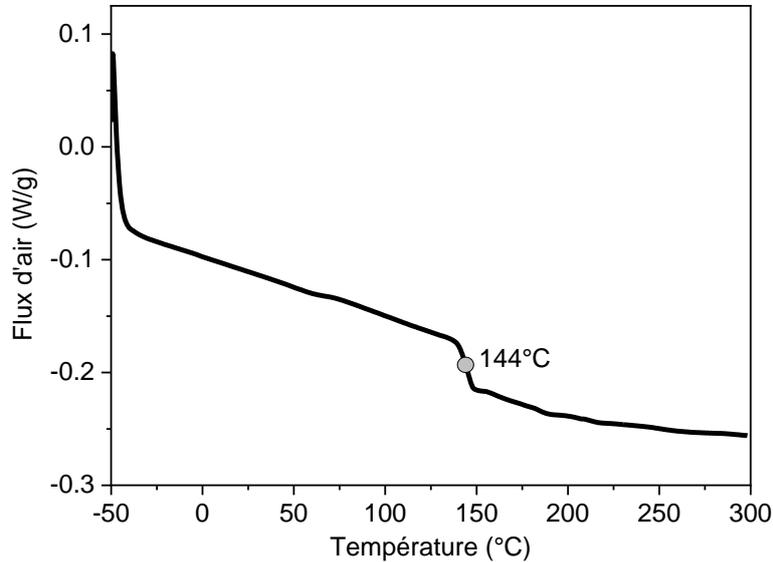


Figure II-5 : Analyse DSC du substrat PC+ABS

La rugosité (R_a) et l'énergie de surface sont des paramètres importants pour la dépose de goutte sur le substrat, ils ont été mesurés, respectivement, par un interféromètre et à l'angle de contact, et sont reportés dans le Tableau 22.

Tableau 22 : Rugosité de surface et énergie de surface du substrat PC+ABS

R_a (nm)	Energie de surface (mJ/m^2)
643±59	45 ($r^2=0,92$)

La mesure des propriétés électromagnétiques de ce substrat sont également menées dans le paragraphe III.2.1.1.b).

II.3. Mise en œuvre d'une encre conductrice

L'encre utilisée dans le procédé de jetting est une composante essentielle car tous les paramètres d'impression sont liés à ses propriétés. Une encre à microparticules d'argent, commercialisé par Henkel - Electrodag 418SS [138] - a été sélectionnée lors d'un travail antérieur, dans le cadre de la Chaire MINT, pour sa compatibilité avec le substrat. A l'origine, cette encre est dédiée à l'impression sérigraphie qui a été mis en œuvre dans les premiers travaux de la Chaire mais elle est également compatible avec la technologie jetting. Cette encre contient 66,5% de particules d'argent et il est nécessaire de la recuire après impression.

Dans cette partie, les principales caractéristiques de cette encre sont étudiées dans le but de pouvoir optimiser les paramètres d'impression.

II.3.1. Caractéristiques de l'encre

II.3.1.1. Taille et agencement des particules

La technique jetting éjecte des gouttes d'encre sur le substrat. Les particules métalliques contenues dans l'encre assurent la conductivité des pistes créées après recuit. Le fabricant donne la distribution granulométrique suivante : $D_{50} < 8 \mu\text{m}$ et $D_{95} < 24 \mu\text{m}$. Cela signifie que 50% des particules d'argent ont un diamètre inférieur à $8 \mu\text{m}$ et 95% des particules ont un diamètre inférieur à $24 \mu\text{m}$. Dans cette encre, les particules d'argent sont sous forme de plaquettes (*flakes*) micrométriques.

Une observation de ces particules d'argent après recuit (90°C pendant 30 min) est réalisée. En Figure II-6 une coupe réalisée au MEB (Microscope Electronique à Balayage) thermoscientific Quattro S sur une ligne de recouvrement $OL_L=50\%$ est présentée. Le cliché réalisé en coupe sur la largeur de la piste (Figure II-6.a) montre que la section de la ligne présente une forme de dôme avec des bords fins et le centre plus épais.

Avec un grossissement plus élevé (Figure II-6.b), les particules et leur agencement sont visibles. Les particules sont globalement positionnées horizontalement, les unes sur les autres. Ceci est favorable à une conduction de courant car les surfaces de contact entre les particules métalliques sont importantes. La taille des particules est comprise entre 1 et $9 \mu\text{m}$ sur ce cliché et elles présentent une forme de plaquette, ce qui est conforme à la fiche technique de l'encre.

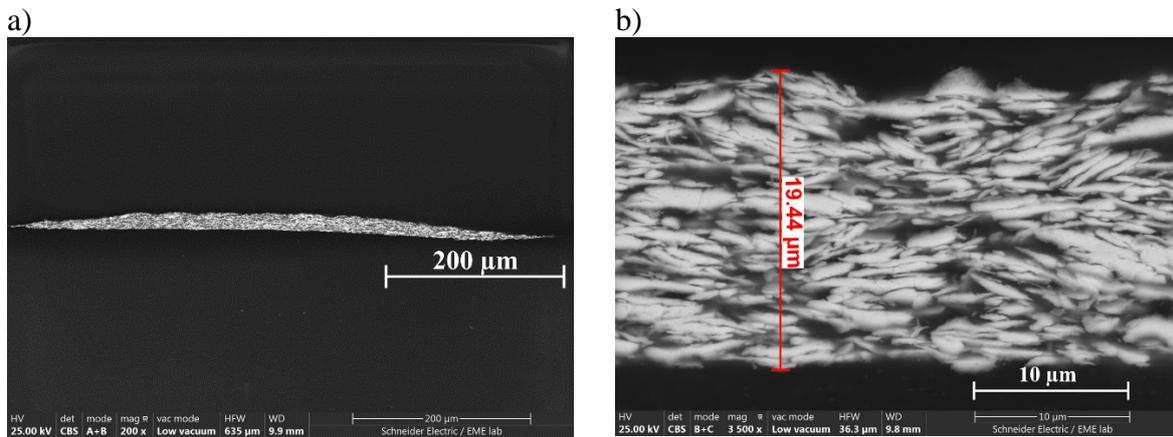


Figure II-6 : Coupe MEB d'une ligne imprimée avec la technologie Vermees après recuit à 90°C pendant 30 min a) agrandissement $\times 200$ b) agrandissement $\times 3500$

Sur la Figure II-7, la surface d'un aplat est présentée. Un agrandissement est réalisé (Figure II-7.b) montrant la disparité de taille des particules et la porosité de surface. En effet, un recuit basse température comme utilisé dans cette thèse ne permet pas une fusion complète des particules entre elles.

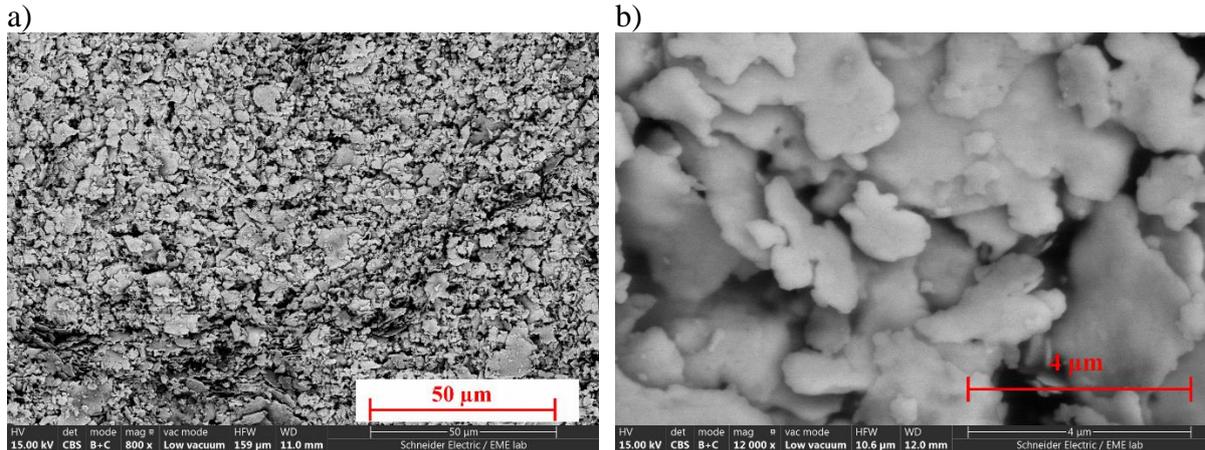


Figure II-7 : Surface au MEB d'un aplat avec la technologie Vermes après recuit à 90°C pendant 30 min a) agrandissement x800 b) agrandissement x12000

II.3.1.2. Etude de la viscosité de l'encre

La viscosité Brookfield (20°C-20 rpm) de l'encre argent indiquée par le fabricant est de 20 Pa.s. Mais cette grandeur est insuffisante pour caractériser le comportement rhéologique d'une encre. C'est pourquoi un rhéogramme a été effectué au LGP2 avec un rhéomètre Anton-Paar. Une géométrie cône/plan avec un diamètre de 50 mm, un angle de 1° et un entrefer de 102 µm est utilisée. Le palier de gradients de cisaillement est constant (entre 600 et 3600 s selon le gradient). Les résultats sont présentés sur la Figure II-8 pour les températures 20°C, 25°C et 30°C.

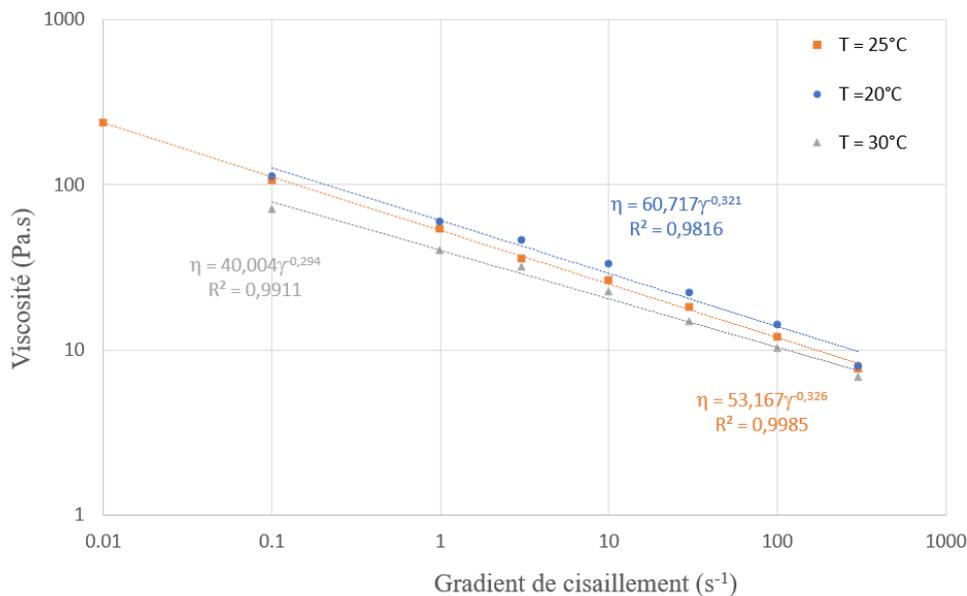


Figure II-8 : Viscosité de l'encre Electrodag 418 SS en fonction du gradient de cisaillement mesurée à 20°C

La viscosité diminue lorsque le gradient de cisaillement augmente, ce qui traduit un comportement rhéofluidifiant. Ce comportement est important pour l'impression Jetting car lorsque le pointeau descend et applique un fort gradient de cisaillement, la goutte doit être fluide à ce moment pour être correctement éjectée sur le substrat. Puis lorsque la goutte est déposée sur le substrat, le comportement solide (module élastique) de l'encre viscoélastique doit devenir

prépondérante par rapport au comportement fluide (module visqueux) pour éviter l'étalement de l'encre. Ces mesures ne sont pas réalisables avec le rhéomètre Anton Paar limité à 2000 s^{-1} car les gradients de cisaillement estimés avec pour le procédé jetting sont de $0,01 \text{ s}^{-1}$ à 4000 s^{-1} (Equation (II.3)).

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{d} \quad (\text{II.3})$$

Avec

- v la vitesse du piston (m/s)
- d la distance cisailée par le piston (m)

Les résultats de la Figure II-8 montre également une diminution de la viscosité lorsque la température augmente. Cela montre alors que l'environnement d'impression doit être à une température stabilisée pour maintenir le comportement de l'encre constant.

II.3.1.3. *Etude thermogravimétrique de l'encre*

Un analyseur TA instrument type 2050 est utilisé, dans le but d'analyser globalement la composition de l'encre à partir des températures de seuil. La fiche technique de l'encre annonce une composition de 66,5% de particules d'argent. Les conditions de recuit recommandées sont de 90°C pendant 30 min.

En Figure II-9, une analyse thermogravimétrique (ATG) de l'encre Henkel est réalisée. Les objectifs de cette étude sont les suivants et seront menés en deux temps :

- Détermination de la composition de l'encre
- Simulation du recuit post-traitement

Dans un premier temps, la composition de l'encre est déterminée. Pour cela, l'encre est chauffée de 20°C (température ambiante) à 850°C avec une rampe de température de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, le départ de la mesure est réalisé à 30°C d'où le début de la courbe en dessous de 100% de la masse (masse initiale prise à 20°C). L'expérience est réalisée sous air malgré l'oxydation du métal car le but ici est également de se rapprocher des conditions de recuit industriels.

Sur le graphique présenté, deux pots d'encre sont analysés : un récent ouvert en 2020 et un plus ancien ouvert en 2018. En comparant les résultats de ces deux pots, il sera possible de déterminer s'il y a des pertes de solvants importantes au cours du temps ce qui pourrait provoquer des comportements différents lors de la mise en œuvre de l'encre. 4 phases sont observables sur le graphique :

- De 30 à 200°C : Evaporation du solvant de l'encre.
- De 200°C à 400°C Destruction de la matrice polymère de l'encre
- De 400°C à 700°C Plateau
- De 700°C à 800°C Perte de masse probablement causée par l'oxydation de l'argent.

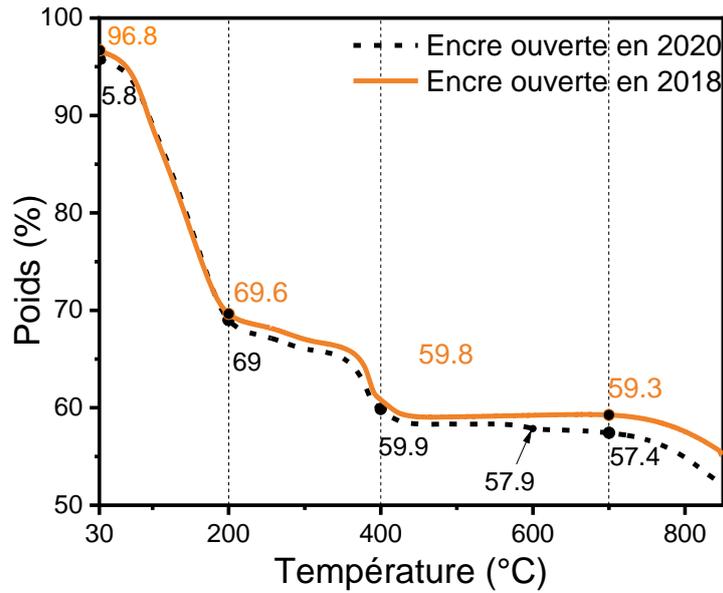


Figure II-9 : ATG de l'encre Henkel : pot ouvert en 2018 et pot ouvert en 2020 protocole 1

Ainsi, il est possible de déduire la composition en pourcentage de l'encre comme décrit dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Composition de l'encre Henkel 2018 et 2020 en pourcentage

	<i>Solvant (%)</i>	<i>Matrice (%)</i>	<i>Argent (%)</i>
Encre 2018	27%	10%	59%
Encre 2020	27%	9%	58%

La différence de composition entre l'encre de 2018 et 2020 n'est pas significative. Le pourcentage d'argent mesuré est de 58% contre 66% annoncé par le constructeur.

Sur la Figure II-10, une simulation du recuit thermique à 90°C pendant 30 min est proposée. L'encre est chauffée en augmentant de 10°C/min jusqu'à 90°C et un palier de 30 min à 90°C est imposé puis une augmentation de 10°C/min jusqu'à 850°C est appliquée. L'expérimentation est réalisée sous azote pour éviter l'oxydation de l'argent.

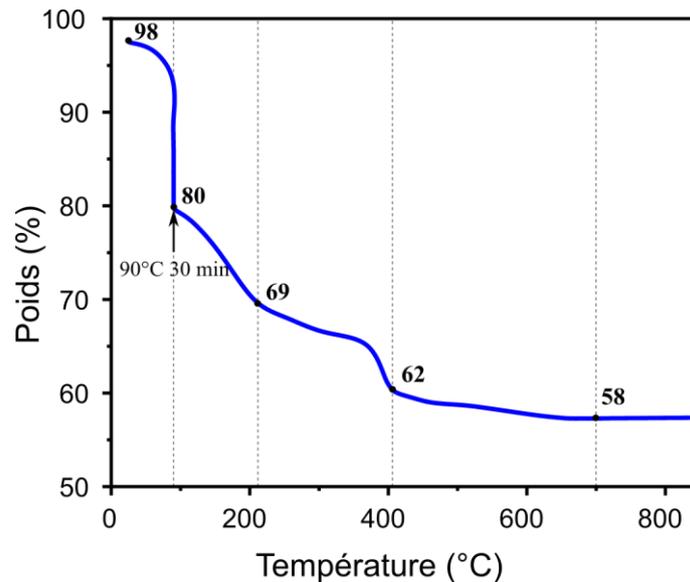


Figure II-10 : ATG de l'encre Henkel : un pot ouvert en 2018 protocole 2

Le graphe montre plusieurs paliers :

- Le palier de 90°C pendant 30 min montre une diminution du poids de l'encre de 18% causé par l'évaporation du solvant. En revanche la totalité du solvant n'est pas évaporé car une inflexion à 69% est visible, il reste donc 11% de solvant non évaporé.
- La matrice montre, à 62%, un palier similaire que dans le graphe précédent (Figure II-9).
- Sous atmosphère neutre l'argent ne montre pas de diminution du poids au-delà de 700°C qui serait causé par son oxydation comme c'était le cas au contact de l'air. La quantité d'argent évaluée à 58% est similaire à celle déterminée sur la Figure II-9.

Cette étude montre que le recuit thermique conseillé par le fournisseur ne permet pas d'évaporer la totalité du solvant présent. Le recuit thermique étant déjà long en termes de temps, d'autres types de recuits peuvent être utilisés pour compléter plus rapidement l'évaporation du solvant. En réalisant à nouveau cet essai avec un palier à 90°C supérieur à 30 min, cela permettra de connaître le temps avant stabilisation de la masse, ce qui indiquera une évaporation totale des solvants et donc une meilleure conductivité du dépôt pour ce temps.

II.3.1.4. *Etude de l'influence du temps après impression sur la largeur de la ligne*

Une étude a été menée afin d'analyser l'influence, sur la largeur des pistes imprimées, du temps entre la fin de l'impression et le recuit des pistes. Pour cela, deux lignes avec un recouvrement OL_L et OL_W à 50 % sont imprimées et placées sous une loupe binoculaire avec une prise automatique d'image toutes les minutes pendant 1h. La largeur des lignes sur chaque cliché est ensuite mesurée. Sur la Figure II-11, la largeur moyenne des lignes non recuites (40 mesures pour chaque point) en fonction du temps est représentée. Tous les points ne sont pas

reportés ici pour une raison de lisibilité : entre 0 et 5 min les largeurs toutes les minutes sont reportées puis entre 5 et 60 min toutes les 10 min.

Une forte augmentation de la largeur est observée durant la première minute (de $590 \mu\text{m}$ à $670 \mu\text{m}$ en moyenne). La largeur devient stable au bout de 1 min pour une valeur moyenne de $686 \pm 3 \mu\text{m}$.

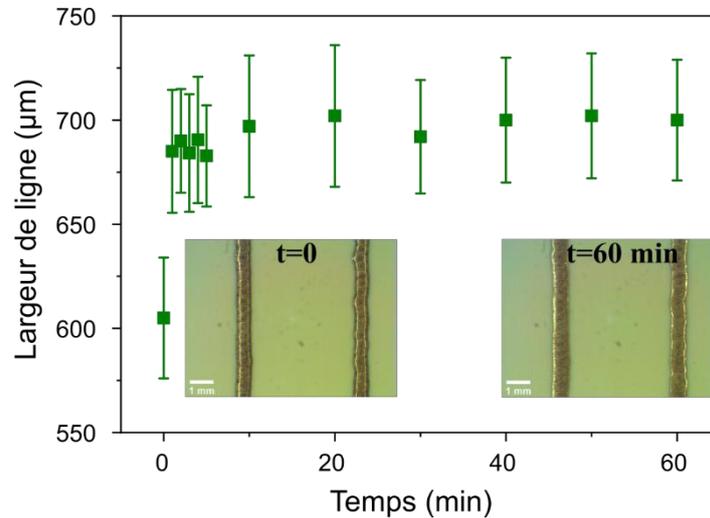


Figure II-11 : Largeur de la ligne imprimée non recuite en fonction du temps

Afin de recuire une piste avec une largeur stabilisée, il ne faut pas diminuer le temps entre l'impression et le recuit en dessous de 1 min. Mais en effectuant un recuit immédiatement après impression, cela peut permettre d'obtenir des pistes avec une largeur plus faible. De la même manière, si on veut faire des interlignes petits, il faut limiter au maximum cet étalement. En revanche, ce comportement d'étalement de l'encre (caractère visqueux prépondérant) peut permettre un certain lissage, sur des aplats par exemple, pour éviter les trop fortes rugosités. Un ajustement des propriétés rhéologiques de l'encre pourrait permettre d'agir sur ce comportement lié au caractère viscoélastique de l'encre.

II.3.2. Post-traitement de l'encre : le recuit

Après impression, une étape de post-traitement est nécessaire afin de rendre la piste conductrice et assurer son adhésion au substrat. Pour cela, un apport d'énergie thermique permet d'évaporer les solvants et d'assurer la percolation des particules métalliques de l'encre. Dans cette étude, le recuit thermique recommandé par le fabricant de l'encre sera utilisé : 90°C pendant 30 min dans une étuve.

II.4. Montage du système d'impression sur robot

Après avoir décrit les composantes du système d'impression, dans cette partie le procédé est présenté dans son ensemble avec le montage de la valve sur le robot 4 axes dans un premier temps et 6 axes ensuite.

II.4.1. Système jetting sur robot 4 axes

II.4.1.1. Caractéristiques générales du robot 4 axes Janome

Dans un premier temps le système d'impression jetting est monté sur un robot Janome JR3304 4 axes. Cette disposition est utilisée afin de déterminer les paramètres d'impression sur un système simplifié.

Le robot Janome possède 4 axes comme présenté en Figure II-12a). La particularité de ce robot est le mouvement de l'axe X qui, dans cette configuration, met également en mouvement la pièce. Ce robot possède un axe de rotation R_z qui permet d'imprimer sur des formes 3D simples. Les caractéristiques en vitesse et en répétabilité, selon les axes, sont répertoriées dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Vitesse et répétabilité du robot Janome 4 axes d'après les données constructeurs (polydispensing.com)

	Vitesse maximale	Répétabilité
Axes X-Y	900 mm/s	$\pm 0,01$ mm
Axe Z	400 mm/s	$\pm 0,01$ mm
Axe de rotation R	900°/s	$\pm 0,008^\circ$

La Figure II-12b) présente le montage du système d'impression Vermes sur le robot Janome.

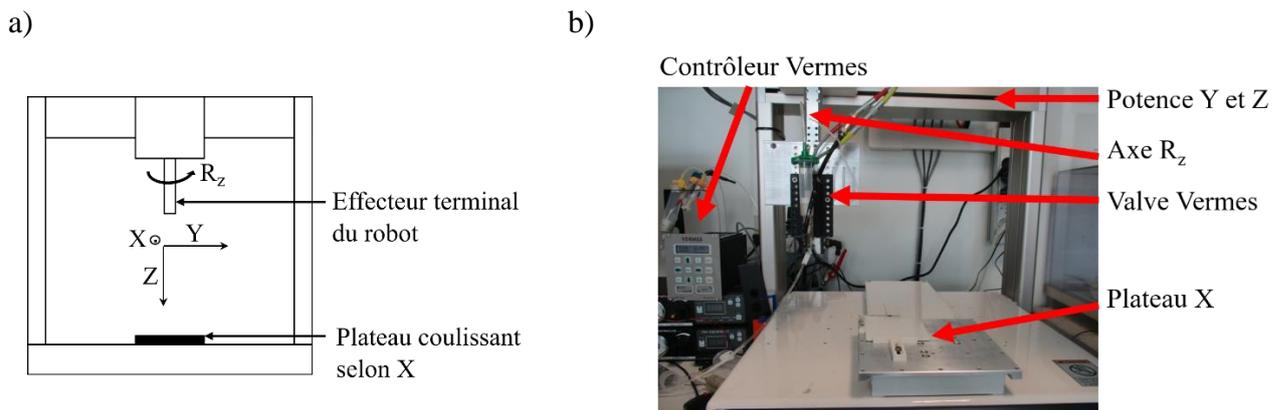


Figure II-12 : a) Schéma de principe du robot 4 axes Janome b) Montage de la tête d'impression sur le robot 4 axes Janome

Le contrôleur Vermes est relié au robot par 2 ports RS232 de communication différents et PLC. Ces deux ports ne permettent pas les mêmes actions :

- Le port RS232 est une voie de communication de type série. Il permet d'envoyer des lignes de commandes et de recevoir des informations pour en particulier paramétrer la tête d'impression Vermes.
- Le port PLC (Programmable Logic Controller) reçoit en entrée une impulsion qui indique à la valve le démarrage du cycle. Il est capable de délivrer des informations en sortie sous la forme binaire (On/off).

Pour le robot 4 axes, le contrôleur Vermes est relié au robot par le port PLC comme montré en Figure II-13. Le système d'impression est actionné par le contrôleur mais il peut également envoyer des informations comme les paramètres utilisés, un code d'erreur ou la

position du piston. Il est également possible de brancher un module de chauffe sur le dispositif, mais il ne sera pas utilisé dans cette étude.

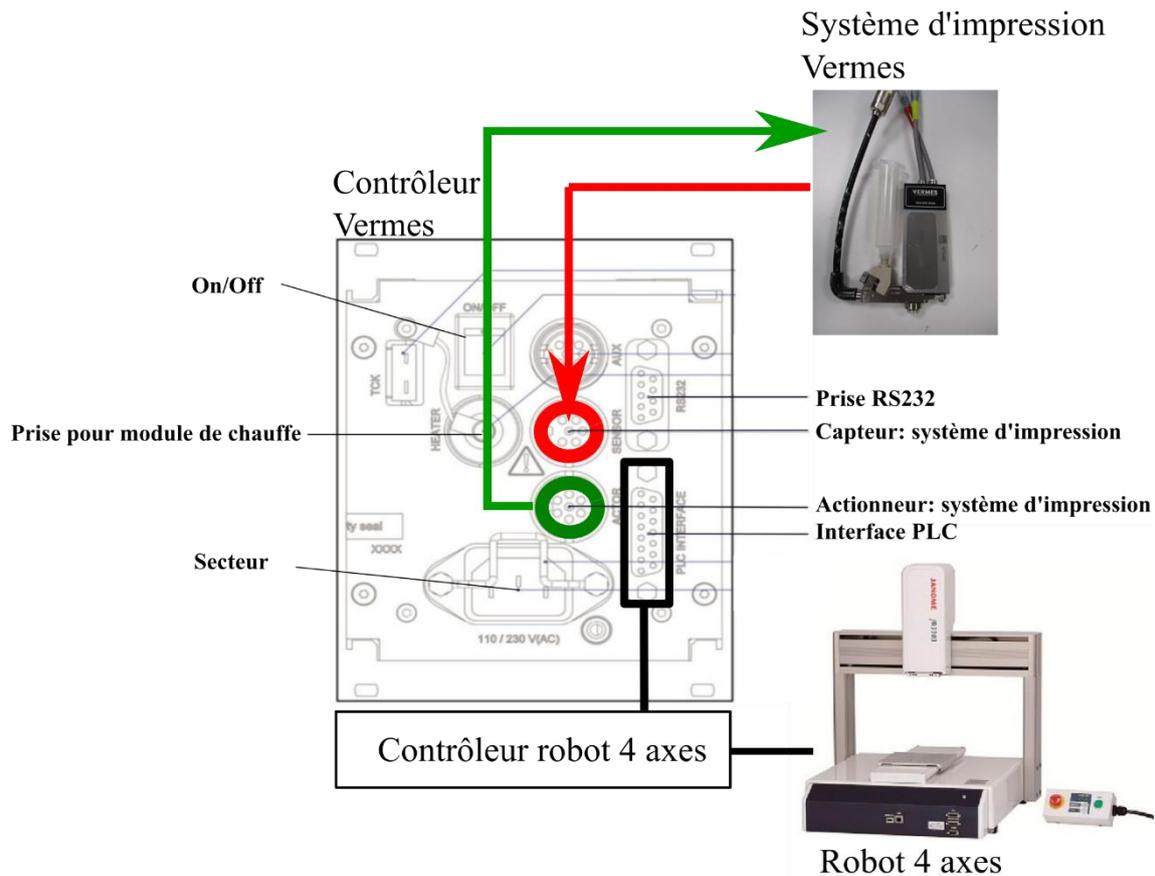


Figure II-13 : Schéma de câblage du robot 4 axes et du système d'impression

II.4.1.2. Programmation du robot 4 axes

Les mouvements du robot sont programmés sur JR C-points, le logiciel du Janome, qui envoie ensuite le code de la trajectoire au contrôleur du robot. Ce dernier pilote à la fois les différents moteurs du robot et le contrôleur Vermes via l'interface PLC. Le pilotage de la trajectoire se fait point à point dans un tableur : les trajectoires simples sont facilement programmables, l'utilisation est plus fastidieuse pour la définition de trajectoires plus complexes. Ce robot sera principalement utilisé, dans une première phase, pour caractériser l'impression, ainsi seulement des trajectoires simples seront implémentées.

La Figure II-14 montre l'interface de pilotage du robot 4 axes Janome. Chaque colonne est associée à un type de point :

- « PTP point » point indépendant
- « CP start point » point de départ
- « CP end point » point d'arrêt
- « CP passing point » point de passage
- « CP arc point » point d'arc

Un point est associé à des coordonnées (X, Y, Z et R), une vitesse, une activation ou non de l'impression (Dispense=On ou Dispense=Off) et des conditions d'impression. Les conditions d'impression permettent de modifier la façon d'imprimer, par exemple il est possible de définir la condition n°2 telle que le début de l'impression s'effectue 1 mm après le début de la ligne, comme montré en Figure II-14. Les coordonnées des points sont définies dans le repère machine du robot qui correspond à sa position d'arrêt.

Il est possible de visualiser la trajectoire du robot. Cependant, le logiciel ne prend pas en compte les conditions d'impression. De plus, il est possible de dessiner la trajectoire dans un éditeur graphique.

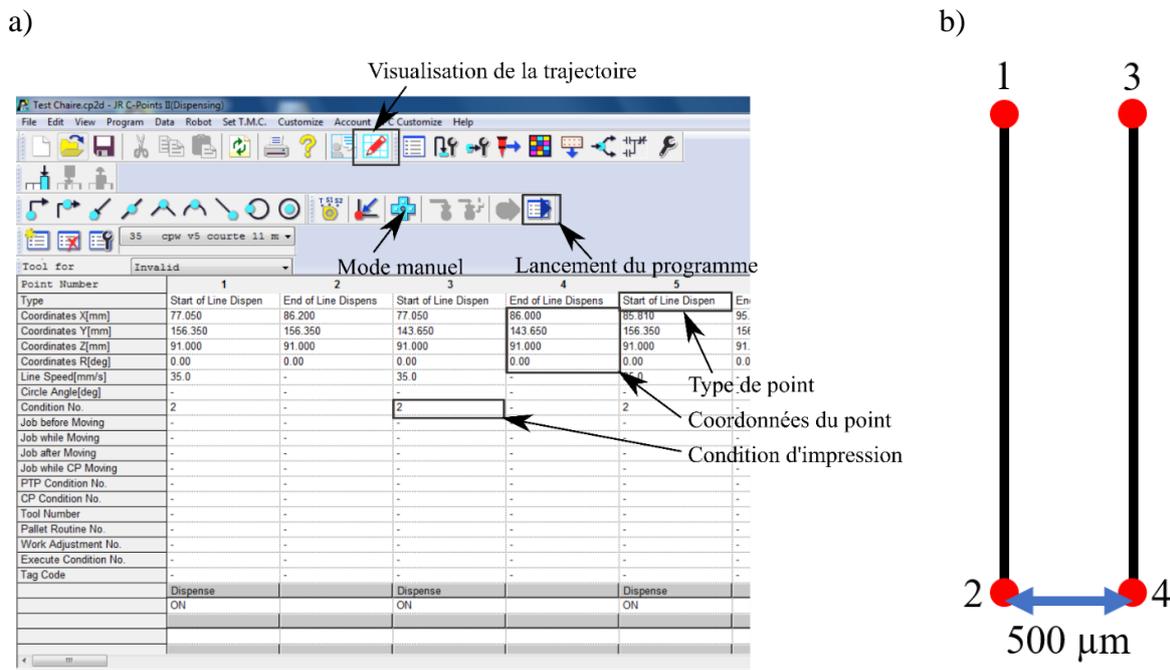


Figure II-14 : a) Interface de pilotage avec le logiciel JR C-Points II du robot 4 axes b) Trajectoire correspondant aux points programmés dans l'interface

II.4.2. Système jetting sur robot 6 axes

II.4.2.1. Robot Stäubli

Stäubli est une entreprise internationale fondée en 1892 en Suisse qui a développé son activité dans la mécanisation de l'industrie du textile ainsi que les connecteurs, les raccords et la robotique. Aujourd'hui, Stäubli propose des robots 4 et 6 axes pour diverses solutions industrielles : peinture, plasturgie, métallurgie, agro-alimentaire, salle blanche ou médicale. L'utilisation de robots Stäubli permet d'atteindre des performances industrielles que ce soit en termes de sécurité, d'intégration avec d'autres dispositifs ou de productivité ce qui est compatible avec les enjeux définis dans la Chaire MINT.

II.4.2.2. Caractéristiques générales du robot 6 axes Stäubli

Le robot Stäubli TX60 possède 6 axes de rotation représentés en Figure II-15a). L'axe 6 porte les outils et est appelé « effecteur terminal » du robot (*end effector*). La précision du robot est de 20 μm et sa vitesse maximale est de 8 m/s. Les vitesses maximales de chaque axe sont reportées dans le Tableau 25.

Tableau 25 : Vitesse maximale pour les 6 axes du robot Stäubli (données constructeurs)

Axes	Vitesse maximale (°/s)
1	435
2	410
3	540
4	995
5	1065
6	1445

Une photo du montage est présentée sur la Figure II-15b), la tête d'impression est montée à 90° de l'axe 6 pour pouvoir pleinement utiliser la rotation de cet axe. Grâce à cette configuration, il est possible d'imprimer sur des substrats 3D variés de forme concave et convexe avec une grande précision.

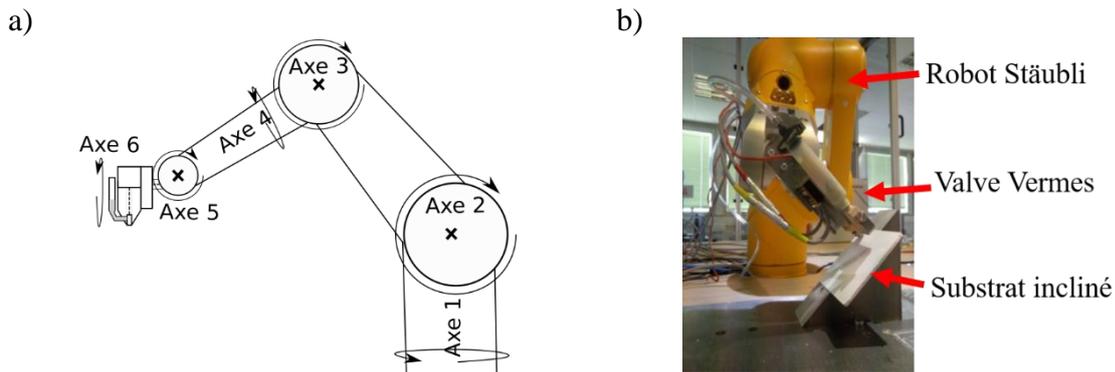


Figure II-15 : Robot 6 axes Stäubli a) Schéma de la structure b) Montage de la tête d'impression Vermes réalisé sur le robot

Sur ce robot, le contrôleur de la tête d'impression est relié par le port RS232 au contrôleur du robot comme montré sur la Figure II-16. La valve est pilotée par des lignes de commandes entrées dans le programme gérant le mouvement.

- Pour une même coordonnée de point, il est possible d'avoir des configurations différentes du bras robotique comme montré en Figure II-17

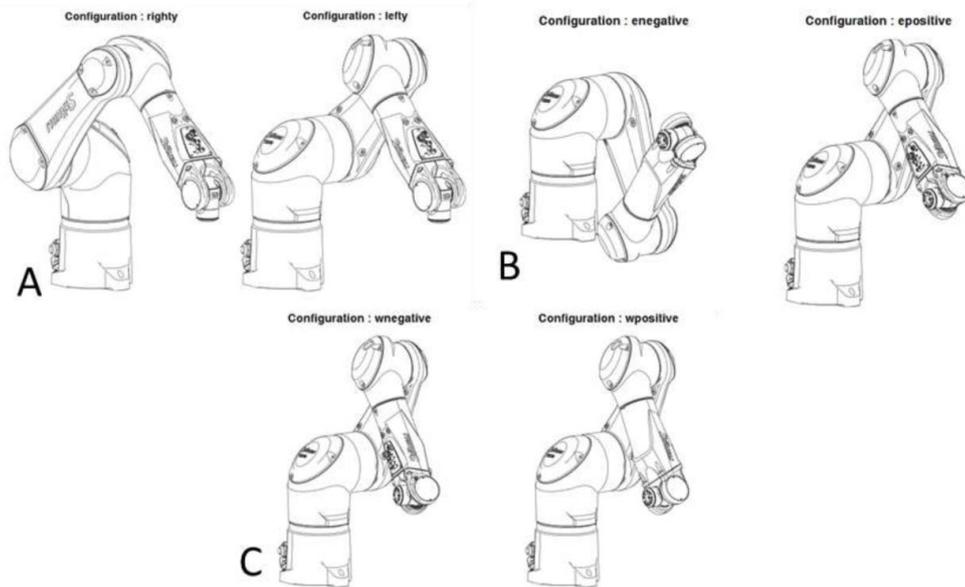


Figure II-17 : Configurations du robot (A) Epaule (B) Coude (C) Poignée [139]

La gestion de l'impression et des trajectoires se fait grâce à l'utilisation de tâches dans la programmation du robot Stäubli. Lorsque plusieurs tâches sont en cours d'exécution, celles-ci semblent être effectuées simultanément cependant le système ne possédant qu'un seul processeur, plusieurs tâches ne peuvent s'effectuer réellement de manière simultanée, ainsi cet effet est simulé par un séquençage rapide des tâches. Ces tâches ont des ordres de priorité qui définissent le nombre de lignes d'instruction à exécuter à chaque séquençement. La Figure II-18 illustre le séquençage des tâches par priorité : les tâches 1, 2 et 3 semblent être réalisées en simultanée sur des temps long (de l'ordre de la seconde) mais en réalité, sur des temps courts (milliseconde), elles sont séquençées.

L'utilisation de tâches permet d'avoir une trajectoire lisse sans point de synchronisation robot-tête d'impression qui demande une pause.

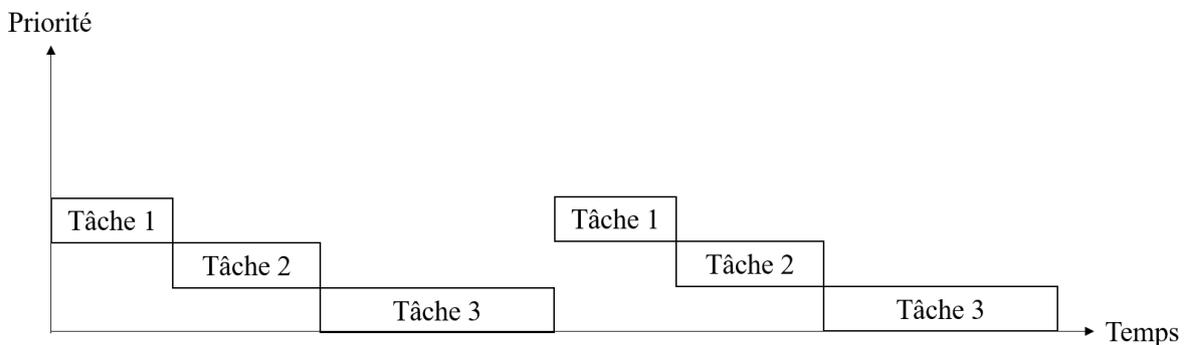


Figure II-18 : Schématisation du séquençage des tâches

II.4.2.1. *Correction de l'outil*

Tout au bout du bras robotique se trouve « l'outil » qui peut être par exemple un préhenseur (pince) permettant de saisir et déplacer une pièce, ou dans notre cas une tête d'impression. Le montage d'un outil sur un robot nécessite la connaissance de ses dimensions. Le correcteur d'outil est une matrice contenant les dimensions d'un outil ajouté au bout de l'effecteur terminal du robot. Cette matrice est ensuite utilisée par le contrôleur du robot pour prendre en compte cette dimension lors d'un mouvement. L'outil doit être mesuré avec précision car il peut engendrer des erreurs de trajectoire.

Pour la fixation du système d'impression sur le robot, un adaptateur a été ajouté entre l'effecteur terminal du robot et la valve. Il a été conçu afin de garantir la précision de placement lorsque l'outil est démonté puis remonté. Il a été fabriqué sur un centre d'usinage, sa manufacture est donc précise mais des mesures de vérification ont été réalisées en supplément. Deux mesures ont été réalisées pour la fixation de l'outil regroupant l'adaptateur et la tête d'impression sur le robot Stäubli :

- Sur une machine de mesure tridimensionnelle (MMT) et une colonne de mesure
- Avec une sphère de mesure qui consiste à pointer 5 points sur une sphère permettant d'en déduire la longueur de l'outil grâce au rayon. Cette mesure présente un avantage majeur : elle peut être réalisée directement sur le robot

II.4.2.2. *Repérage des pièces*

Le repérage des pièces par rapport aux repères du robot dans cette étude sera réalisé à la manière des robots de production : avec des repères de travail. Pour une surface 2D ou 3D, deux repères sont définis :

- Le repère du support : permet de placer le support dans le repère du robot. En cas de mouvement du support, il suffit de définir à nouveau ce repère et tous les points sont à nouveau en bonne position.
- Le repère de l'objet 2D : la pièce 2D est bridée dans son support, ce repère ne peut donc pas être déplacé. Un changement de pièce pour la réalisation d'une série par exemple, replacera la pièce à une position similaire à la pièce précédente.

Ces repères sont illustrés en Figure II-19.

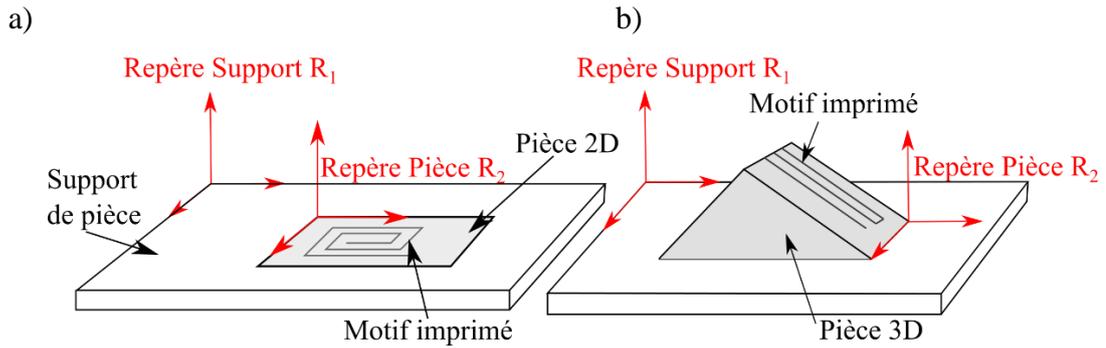


Figure II-19 : Définition des repères de travail pour repérer des pièces a) 2D b) 3D

Afin de programmer la trajectoire de l'outil à la surface de la pièce, des points de coordonnées de la pièce dans un repère doivent être connus. Pour cela, il existe plusieurs solutions :

- Le modèle CAO est donné : les coordonnées sont alors directement accessibles. Dans un procédé industriel, l'obtention du fichier de CAO est possible dans la plupart des cas
- La pièce peut être mesurée : les coordonnées peuvent en être déduites
- Un outil de pointage du robot doit être utilisé pour relever en mode manuel les coordonnées des points.

Sur la Figure II-20 un exemple de support de pièce réalisé est présenté. Il permet de faciliter la prise de coordonnées du repère et d'assurer un positionnement toujours similaire pour ce prototype. Le support est réalisé dans de l'aluminium par usinage. Un support tel que celui-ci est réalisé pour chaque prototype.

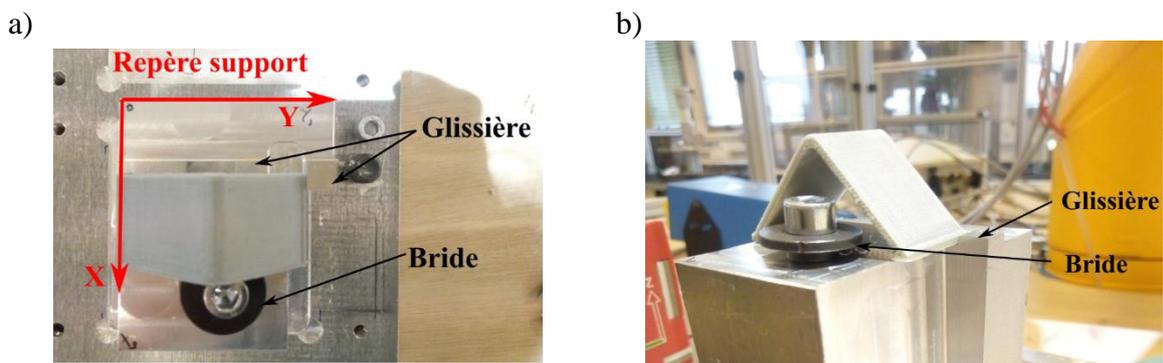


Figure II-20 : Exemple de support de pièces à imprimer a) Vue du dessus b) Vue de face

II.5. Optimisation du procédé d'impression

Les différentes composantes du procédé jetting ont été présentées, dans cette partie les paramètres optimaux pour une impression reproductible et maîtrisée sont investigués : les paramètres temporels de la tête d'impression et les stratégies dynamiques de l'impression. L'objectif de cette partie est d'obtenir une piste conductrice dont les propriétés correspondent au cahier des charges fixés en déterminant des paramètres optimaux.

II.5.1. Optimisation des paramètres temporels de la tête d'impression

II.5.1.1. Matériels et méthodes

II.5.1.1.a) Caractérisation géométrique

Pour la caractérisation géométrique des motifs imprimés, une loupe binoculaire est utilisée pour mesurer les largeurs et les longueurs. Pour la mesure des épaisseurs, un interféromètre Bruker (type Contour GT-K1) est utilisé dans les laboratoires de Schneider Electric (TEC38). Cet appareil utilise le principe d'interférométrie de Michelson qui consiste à mesurer la différence de phase entre deux ondes et d'en déduire la différence de marche, c'est-à-dire la distance parcourue en plus par une des ondes [140]. Il est alors possible de mesurer précisément la morphologie des lignes avec cette technique.

Sur la Figure II-21 quelques exemples de mesures effectuées avec l'interféromètre et la loupe binoculaire sont présentés. Les clichés obtenus avec la loupe binoculaire sont ensuite mesurés avec le logiciel ImageJ.

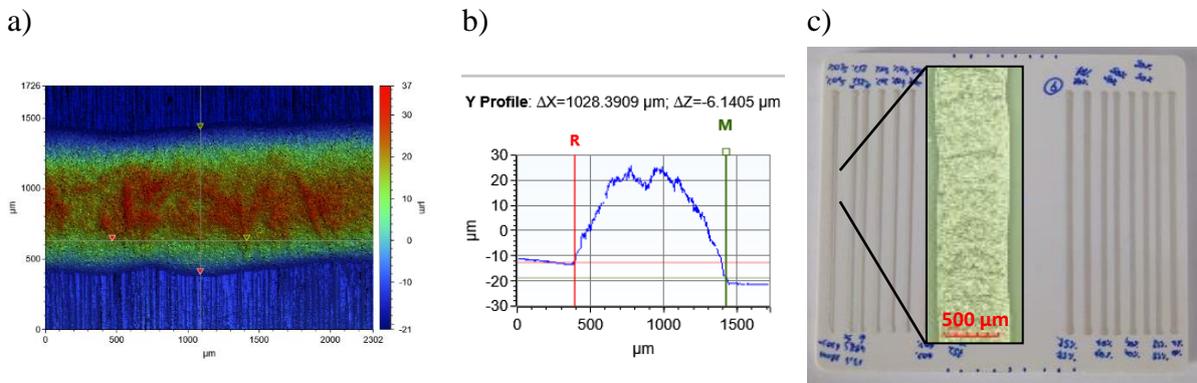


Figure II-21 : a) Cartographie d'épaisseur d'une ligne (interféromètre) b) Profil de la ligne (interféromètre) c) Vue d'ensemble d'une plaque imprimée (loupe binoculaire)

Les paramètres d'impression sont optimisés pour l'encre Henkel Edag 418SS utilisée tout au long de cette étude. En cas de changement de l'encre, une nouvelle optimisation des paramètres est nécessaire car ceux-ci dépendent du comportement rhéologique de l'encre. Le substrat PC+ABS décrit dans la partie précédente est utilisé car il possède les caractéristiques d'un plastique injecté de boîtier couramment utilisé par Schneider Electric. Le robot 4 axes Janome est utilisé pour cette optimisation car les trajectoires sont simples et la 3D n'est pas nécessaire pour cette étape.

Dans un premier temps, les paramètres d'impression sont ajustés expérimentalement pour que l'éjection des gouttes s'effectue de manière fiable. En effet, certaines combinaisons ne permettent pas d'obtenir d'éjection, d'autres combinaisons permettent d'obtenir une éjection mais de manière erratique.

Dans cette étude, la combinaison de paramètres permettant d'obtenir à coup sûr une éjection de goutte est dite « standard ». A partir de cette combinaison, chaque paramètre est modifié individuellement pour observer son influence sur l'impression. La combinaison standard est détaillée dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Combinaison standard de paramètres avant optimisation

<i>Paramètres</i>	t_{ris}	t_{open}	t_{fall}	t_{delay}	<i>NL</i>	V_{print}	<i>Pression</i>	d_{print}
<i>Valeurs</i>	0,4 ms	0,8 ms	0,1 ms	35 ms	65%	35 mm/s	5 bars	1 mm

Pour observer l'influence des paramètres du système sur l'impression, l'analyse est tout d'abord effectuée sur des gouttes indépendantes. En utilisant l'équation (II.2) avec les valeurs suivantes : $t_{ris}=0,4$ ms, $t_{open}=0,8$ ms, $t_{fall}=0,1$ ms, $t_{delay}=35$ ms et $v_{print}=35$ mm/s, la distance entre gouttes est de 1,3 mm ce qui est suffisant pour observer des gouttes individuelles (diamètre d'environ 600 μm). Des lignes de gouttes sont imprimées sur une longueur de 5 cm pour tester chaque paramètre. Après impression, le même recuit est réalisé sur tous les échantillons : 90°C pendant 30 min.

Les mesures de longueurs et largeurs de gouttes sont réalisées avec une loupe binoculaire. Les mesures réalisées sont définies sur la Figure II-22 sur un ensemble de 12 gouttes successives, permettant ainsi d'obtenir une moyenne et un écart type. Les mesures d'épaisseurs sont réalisées sur 5 gouttes avec l'interféromètre, l'épaisseur étant calculée en moyennant les points les plus hauts du dôme correspondant au sommet de la goutte (partie en rouge sur la Figure II-22.b).

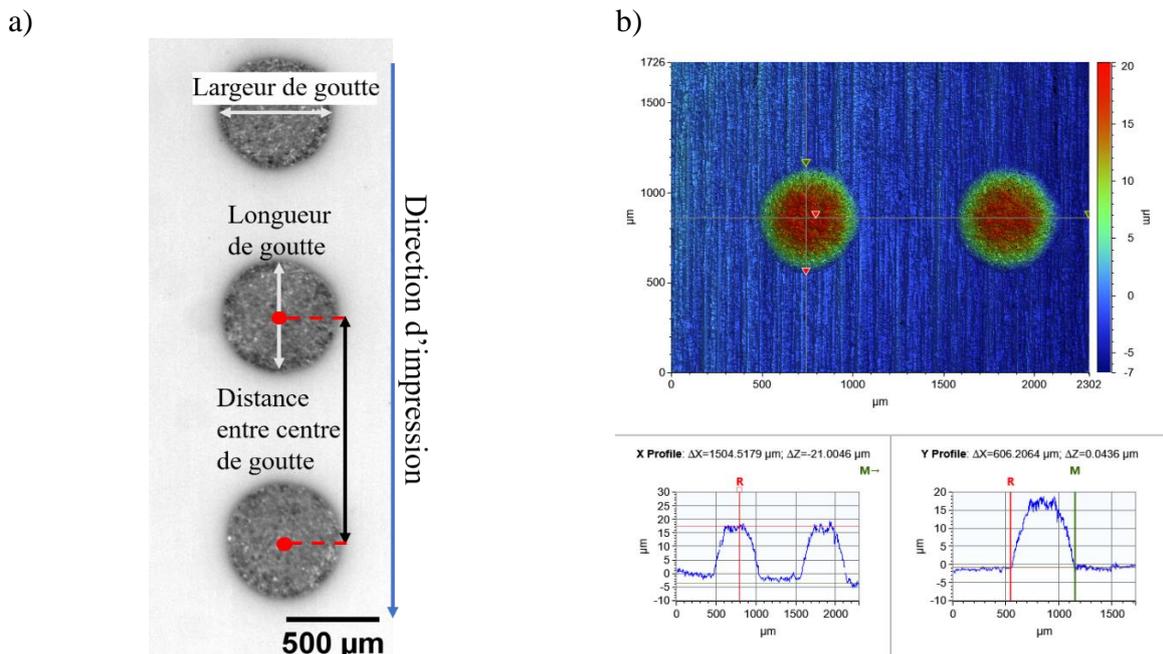
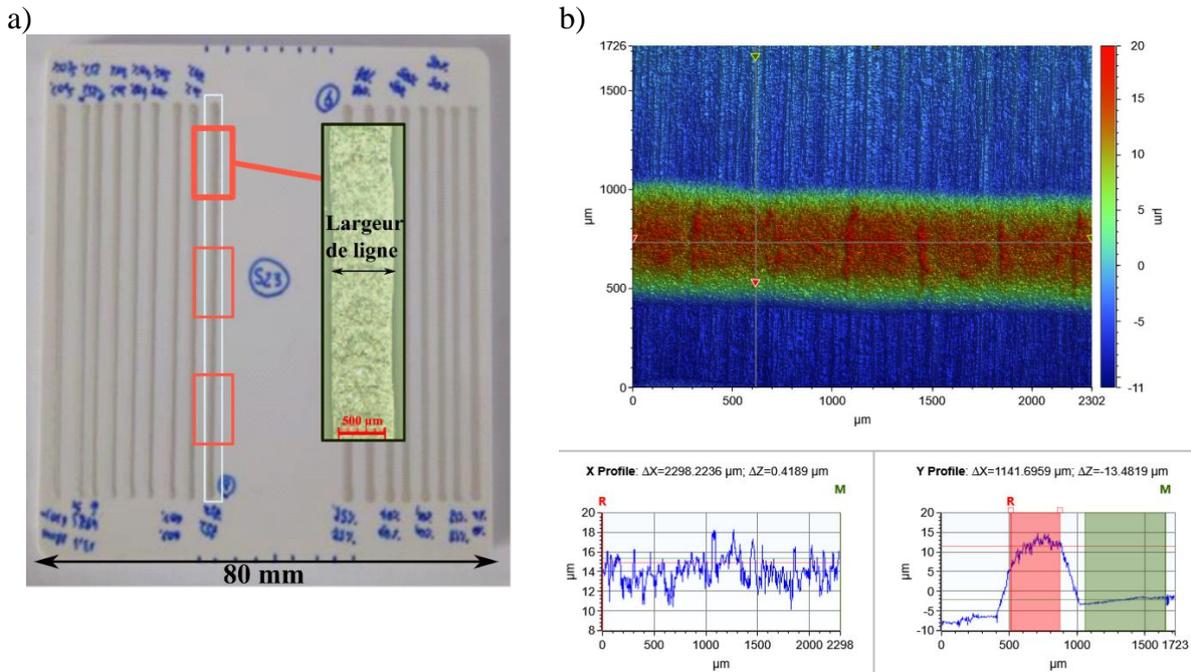


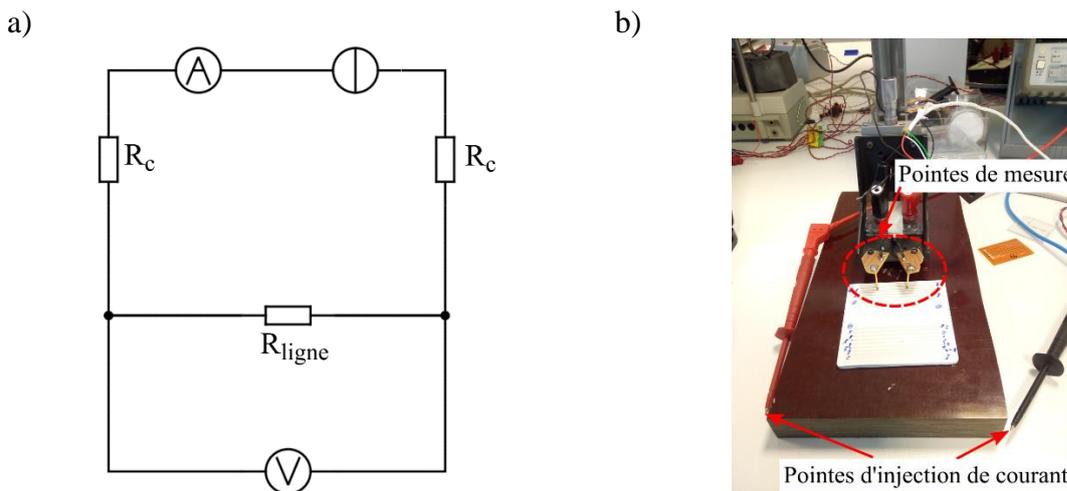
Figure II-22 :a) Illustration de la mesure des gouttes à la loupe binoculaire b) Exemple de mesure de l'épaisseur à l'interféromètre

Les lignes sont mesurées avec la même méthode que les gouttes : les largeurs sont mesurées avec une loupe binoculaire et les épaisseurs avec l'interféromètre comme montré en Figure II-23.



II.5.1.1.b) Caractérisation électrique

La méthode 4 fils a été utilisée pour les mesures de conductivité car elle permet de minimiser les erreurs de mesure pour le cas de faibles valeurs de résistances ($< 10 \text{ Ohms}$), erreurs liées à la résistance des conducteurs parcourus par le courant y inclut les résistances de contact avec la ligne conductrice à mesurer. Un générateur injecte le courant par deux pointes sur une ligne conductrice, la différence de potentiel est mesurée par deux autres pointes de mesures, comme montré en Figure II-24.



Les pointes de mesure peuvent être fixes, comme montré sur la photo, ou mobiles pour les surfaces 3D. En utilisant cette méthode, le résultat n'est pas impacté par les résistances de

contact (R_c) ni par la résistance interne de l'appareil de mesure. La conductivité, σ (S/m) est calculée par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{L}{R_{\text{ligne}}S} \qquad R_{\text{ligne}} = \frac{U}{I} \qquad (II.4)$$

Avec

- L l'écartement entre les pointes de mesure (m)
- R_{ligne} la résistance de la ligne entre les pointes (ohm)
- S la section de la ligne traversée par le courant (m²)
- U la tension mesurée (V)
- I le courant imposé (A)

II.5.1.2. *Optimisation de l'impression de gouttes*

Dans une première phase d'étude du procédé, l'influence des paramètres d'impression sur la forme des gouttes d'encre est investiguée car la qualité des lignes imprimées dépend de la régularité des gouttes. L'objectif est de déterminer un jeu de paramètres d'impression permettant d'obtenir des gouttes aux dimensions répétibles pour former une piste conductrice. Pour cette étude, la mise en œuvre est effectuée avec le robot 4 axes Janome décrit dans le paragraphe II.4.1.

II.5.1.2.a) Influence de la pression d'air dans la seringue d'encre

La combinaison standard de paramètres d'impression est appliquée pour étudier l'influence de ce paramètre pression d'air (Tableau 26)

Il ressort que cette pression d'air est un paramètre essentiel pour obtenir des gouttes de formes régulières. La Figure II-25 présente l'évolution des largeurs et des formes des gouttes. Si la pression est trop faible l'écoulement de l'encre en direction de la buse n'est pas assuré compte tenu de la viscosité. Cela explique les défauts pour les pressions 2 et 3 bars. A partir de 4 bars la forme et la largeur sont plus régulières. Les mesures ont été effectuées sur 20 gouttes successives sur une ligne composée de gouttes indépendantes.

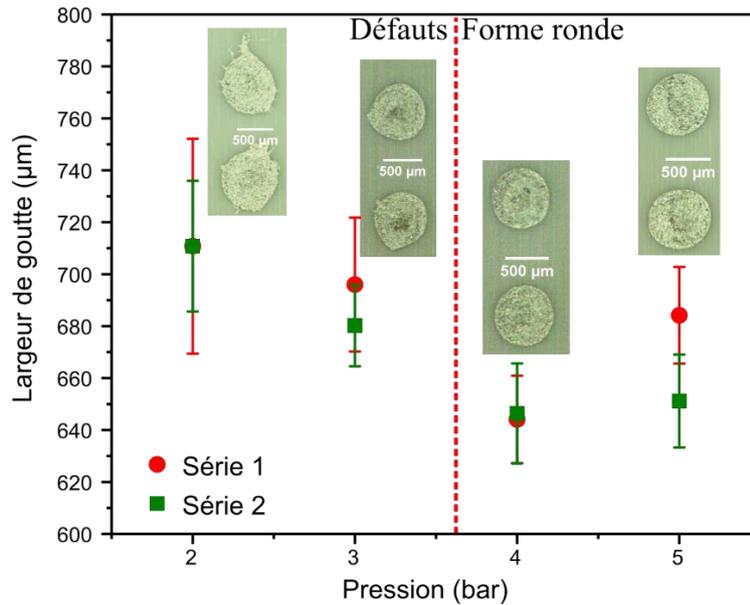


Figure II-25 : Largeur des gouttes imprimées avec le système d'impression Vermes (paramètres standards, Tableau 26) en fonction de la pression dans la seringue sur 2 séries

II.5.1.2.b) Influence du temps de montée et de descente du piston

Les t_{fall} et t_{ris} sont qualitativement définis. Sur la Figure II-26, des photographies de gouttes lorsque t_{fall} est inférieur à 0,1 ms sont présentées. En effet, la descente du piston doit être rapide afin d'éjecter la goutte d'encre sur le substrat. Le constructeur recommande également un temps t_{fall} petit pour des encres visqueuses, comme dans notre cas.



Figure II-26 : Photographies de gouttes avec $t_{fall} < 0,1$ ms

t_{ris} a un impact minimum dans le cycle du piston car il n'influence ni l'éjection ni le volume d'encre éjectée. De plus, il est souhaitable de modifier la fréquence d'éjection avec un unique paramètre sans modifier le volume de la goutte avec t_{delay} . Ainsi, t_{ris} est fixé à 0,4 ms qui permet d'imprimer pour une large gamme de paramètres.

II.5.1.2.c) Influence de la distance d'impression

La distance d'impression d_{print} est la distance entre la buse du système d'impression et la surface du substrat. L'objectif de cette analyse est de connaître la gamme de valeurs de cette distance au substrat pour que les gouttes soient régulières et alignées. Ceci donnera par ailleurs une tolérance en particulier quant à l'impression en 3D, pour le cas de pièces qui peuvent présenter des imperfections géométriques par rapport à leur modèle

Les lignes de gouttes sont imprimées avec la combinaison de paramètres standards (Tableau 26). Différentes distances d'impression sont investiguées : 320, 820, 1300, 1800, 2800, 3800 et 4800 μm . Trois mesures sont réalisées :

- Largeur et longueur des gouttes telles que définies sur la Figure II-22
- Distance entre les centres de gouttes

Les mesures sont réalisées sur 43 gouttes successives pour chaque distance d'impression.

La Figure II-27 présente les largeurs et longueurs des gouttes en fonction de la distance d'impression. En prenant en compte l'écart type, la largeur (moyenne de 632 μm) et longueur (moyenne de 598 μm) des gouttes sont constantes sur la gamme de distance de l'étude. Il est à noter que l'écart type augmente lorsque la distance d'impression augmente, en particulier à partir de 1800 μm ce qui traduit une reproductibilité des dimensions de gouttes variables. Cela pourra être pénalisant pour des applications nécessitant une haute résolution.

Les gouttes sont considérées comme parfaitement circulaires lorsque leur largeur et longueur moyennes se superposent. Pour des distances d'impression inférieures à 1800 μm , l'écart entre largeur et longueur est inférieur à 32 μm .

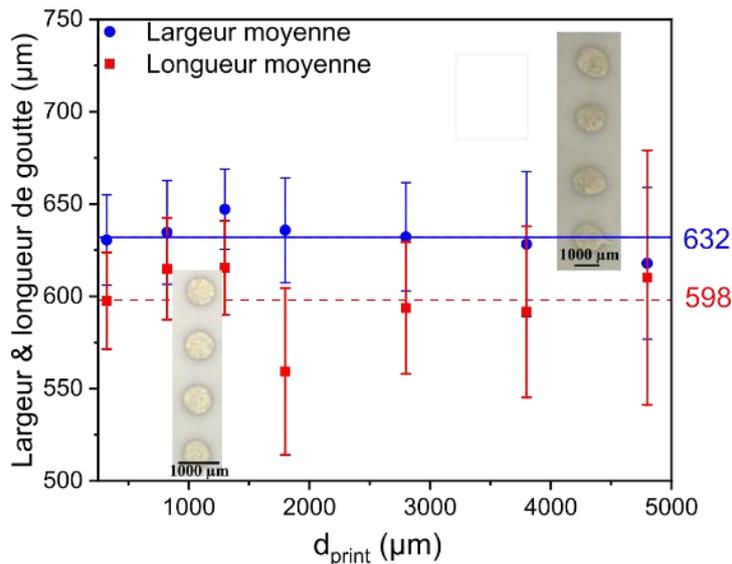


Figure II-27 : Influence de la distance d'impression (d_{print}) de la tête Vermes par rapport au substrat sur la largeur et la longueur des gouttes

L'analyse suivante porte sur la distance entre gouttes, d_{dd} , en fonction de la distance d'impression tel que présentée Figure II-28. Chaque point est une moyenne de 36 mesures. La distance entre les gouttes est constante sur la gamme de distance de l'étude, avec une augmentation importante de l'écart type à partir de 2800 μm . La valeur théorique de d_{dd} donnée par l'Equation (II.2) est, ici de 1271 μm (courbe rouge continue). Un écart de 10 μm (<1%) est observé avec la valeur expérimentale. Cependant, il est compris dans l'écart type de chaque mesure et n'est donc pas significatif.

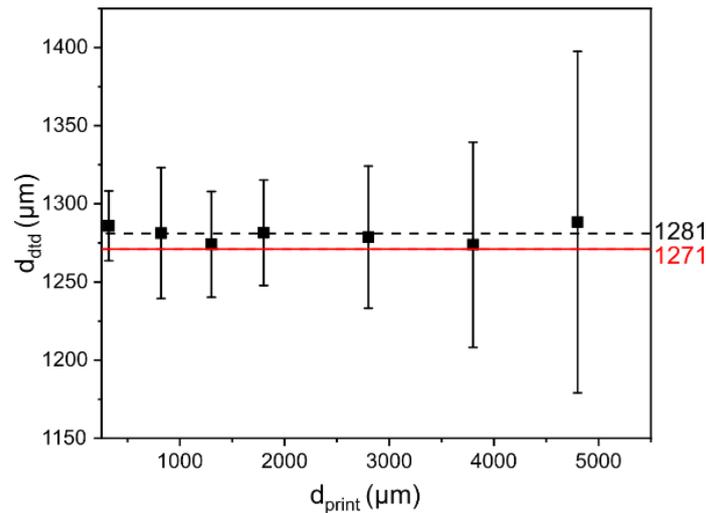


Figure II-28 : Influence de la distance d'impression (d_{print}) de la tête Vermes par rapport au substrat sur la distance entre centre de gouttes (d_{did})

La Figure II-29.a) et b) montrent des photographies des gouttes pour différentes distances d'impression : la déformation des gouttes est importante pour une distance de 4300 μm

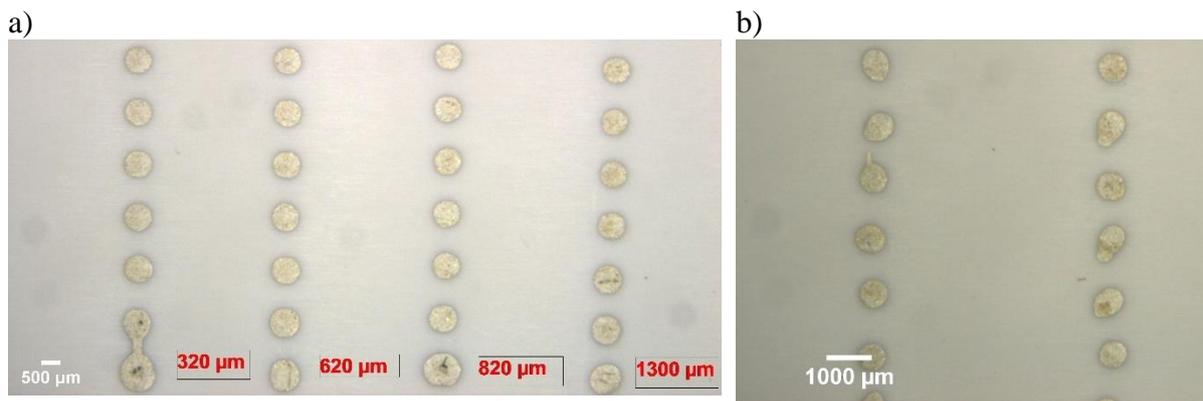
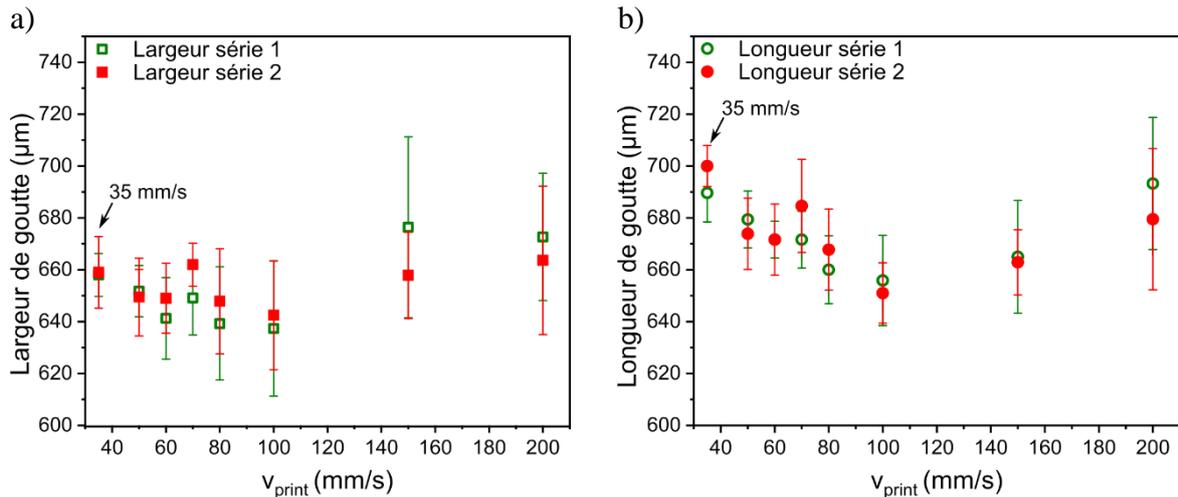


Figure II-29 : a) Photographie de gouttes imprimées à une distance de 320 μm à 1300 μm b) Photographie de gouttes imprimées à la distance de 4300 μm

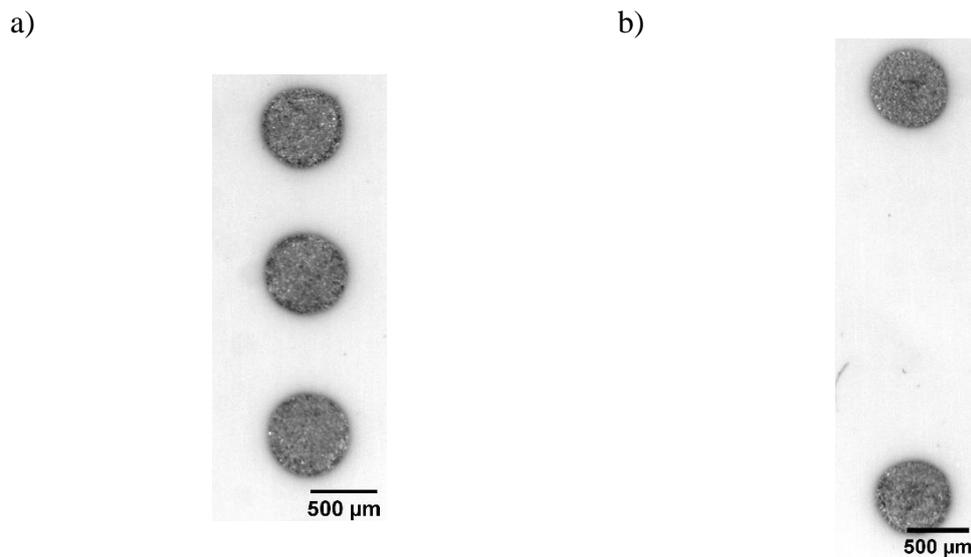
Les irrégularités dans la forme des gouttes sont plus importantes pour des distances à partir de 1,8 mm, notamment dans le sens de largeur. La distance entre gouttes devient également plus aléatoire.

II.5.1.2.d) Influence de la vitesse d'impression

L'objectif est d'analyser si une vitesse plus importante d'impression peut induire un éventuel impact sur la forme de la goutte. Sur la Figure II-30 les longueurs et largeurs de gouttes sont présentées pour différentes vitesses d'impression jusqu'à 200 mm/s.



La valeur des longueurs et largeurs passe par un optimum et il y a une augmentation de l'écart type qui atteint $16 \mu\text{m}$ à 200 mm/s . Malgré cela, la forme de la goutte reste circulaire pour des vitesses élevées comme montré en Figure II-31.



II.5.1.2.e) Influence du temps d'ouverture et de l'amplitude de montée du piston

Le temps d'ouverture du piston t_{open} et l'amplitude du piston NL, déterminent le volume d'encre qui s'écoule jusqu'à la buse avant l'éjection sous forme de goutte sur le substrat. Pour analyser l'impact de ces paramètres sur l'impression de gouttes, les mesures suivantes sont réalisées :

- Largeur et longueur de goutte
- Epaisseur de la goutte

5 séries ont été imprimées pour un t_{open} entre 0,3 et 1 ms et quatre séries pour un t_{open} entre 2 et 8 ms. Pour chaque valeur de t_{open} , NL varie entre 60% et 100%. Pour chaque mesure, 12 gouttes sont analysées sur chaque ligne.

Ces résultats sont présentés sous deux formes : la largeur des gouttes en fonction du temps d'ouverture du piston, t_{open} , en Figure II-32 et la largeur de gouttes en fonction de l'amplitude de montée du piston, NL, en Figure II-33.

Concernant l'évolution de la largeur de gouttes en fonction de t_{open} (Figure II-32), peu de variations sont enregistrées de 0,3 à 14 ms pour NL=80% : une largeur moyenne de 691 μm avec une variation de 6%. Pour NL=100%, une largeur moyenne de 701 μm avec une variation de 7% est enregistré. En prenant en compte l'écart type des largeurs moyennes, il y a peu de variation de largeur entre NL=80% et NL=100%.

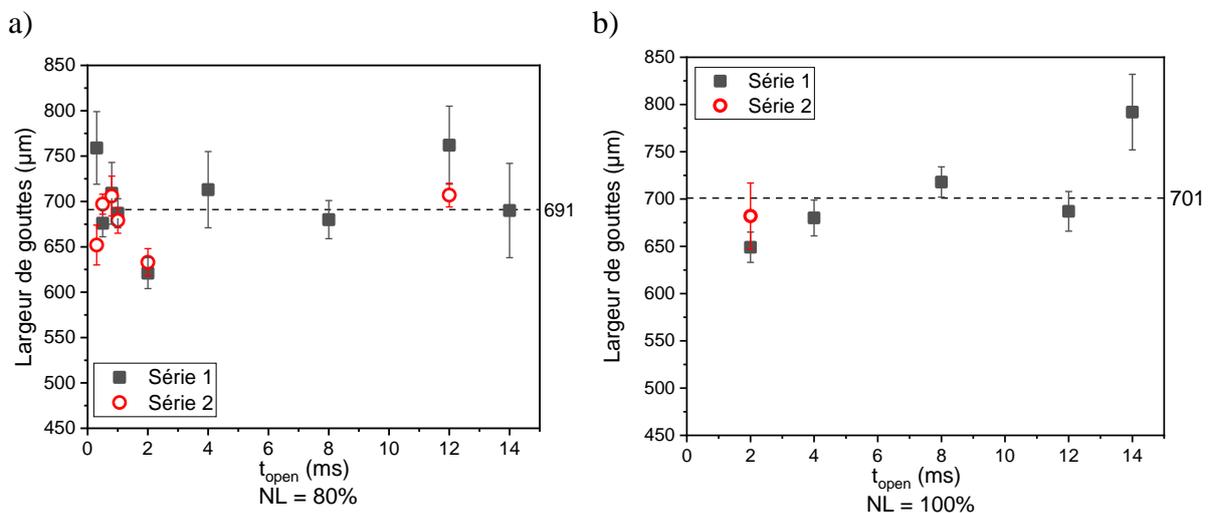


Figure II-32 : Largeur des gouttes en fonction de t_{open} pour a) NL=80% b) NL=100%

Sur la Figure II-33, la largeur de gouttes en fonction de l'amplitude de montée du piston est présentée pour des temps d'ouverture du piston allant de 0,3 à 8 ms. Concernant l'évolution de NL, la largeur augmente quand NL augmente : pour $t_{open}=2$ ms par exemple à NL=60% largeur moyenne est de $562 \pm 9 \mu\text{m}$, pour NL=100%, la largeur moyenne est de $649 \pm 16 \mu\text{m}$ (Figure II-33.e). Le volume d'encre éjecté est plus important quand NL est haut car le pointeau monte plus haut. Une diminution de l'écart type est à noter pour un t_{open} de 2 à 4 ms (hormis un point à 4 ms pour NL=80%). L'écart type diminue à partir de 2 ms ce qui pourrait correspondre à une valeur de temps d'ouverture correcte afin de remplir suffisamment le volume du piston pour former une goutte à l'éjection.

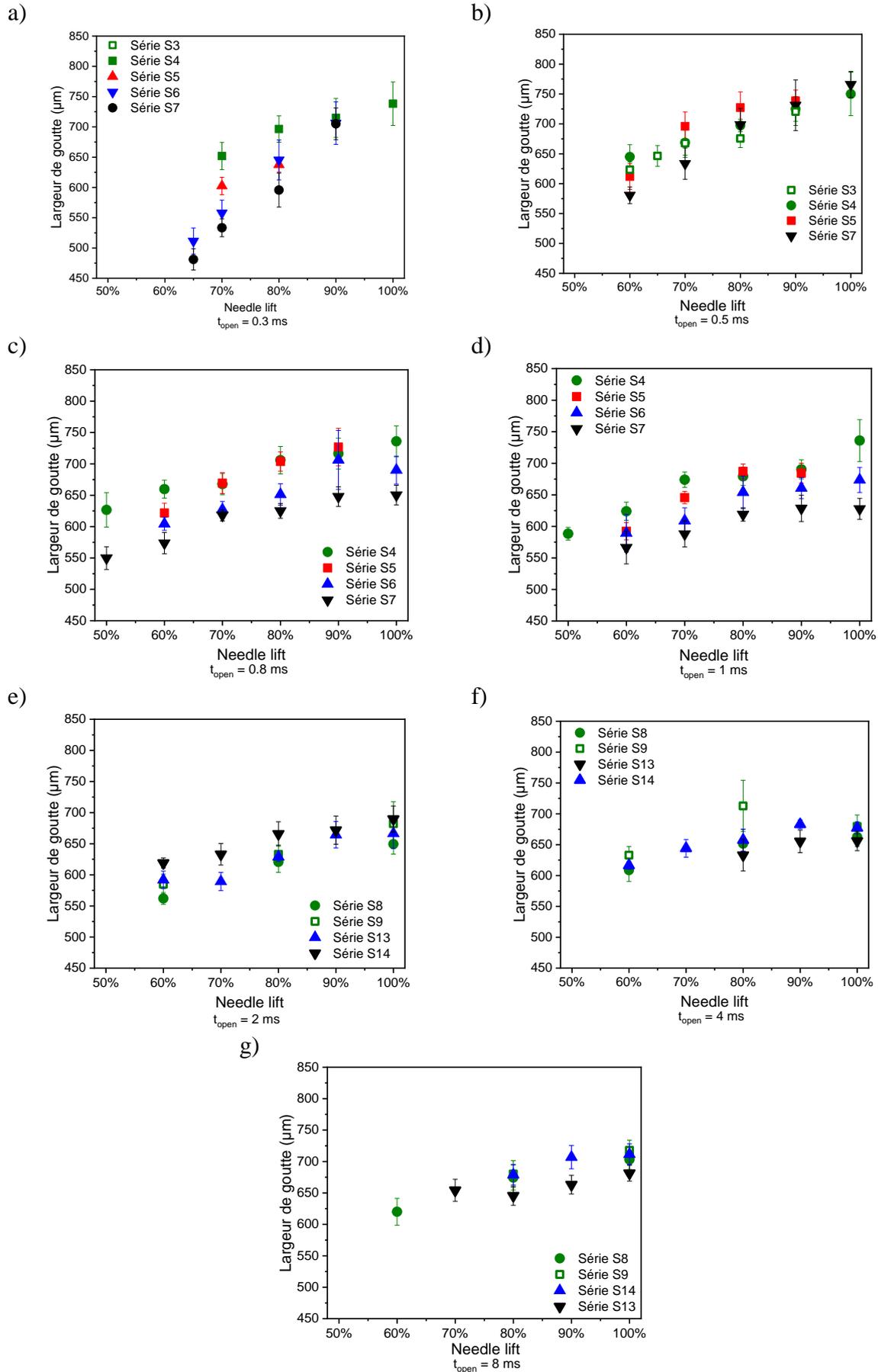


Figure II-33: Influence du temps d'ouverture du piston t_{open} sur la largeur des gouttes en fonction de NL avec = a) 0,3 ms b) 0,5 ms c) 0,8 ms d) 1 ms e) 2 ms f) 4 ms g) 8 ms

Sur la Figure II-34 l'évolution de l'épaisseur des gouttes en fonction du temps d'ouverture du piston, t_{open} , et de l'amplitude de montée du piston, NL, est présentée. Pour chaque point une moyenne et un écart type sont calculés pour 8 gouttes mesurées.

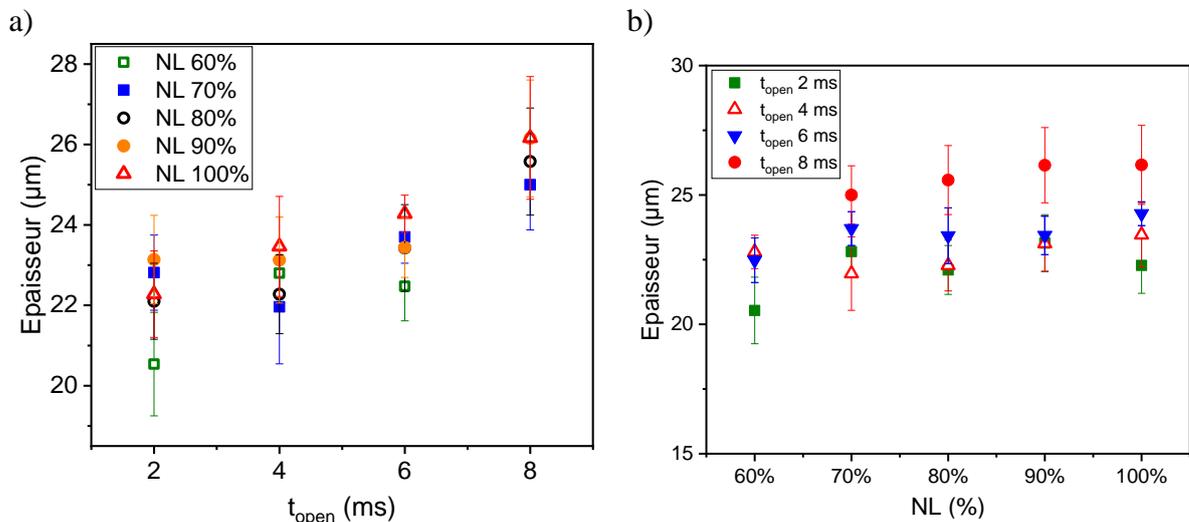


Figure II-34 : Evolution de l'épaisseur des gouttes a) En fonction de t_{open} pour NL variant de 60% à 100% b) En fonction de NL pour un t_{open} variant de 2 ms à 8 ms

L'épaisseur augmente quand le temps d'ouverture du piston, t_{open} , augmente quelle que soit l'amplitude de montée du piston : pour t_{open} de 2 ms et NL de 60% l'épaisseur est de $20,5 \pm 1,0 \mu\text{m}$ et pour t_{open} de 8 ms et NL de 100% l'épaisseur moyenne est de $26,5 \pm 1,5 \mu\text{m}$.

Concernant l'épaisseur en fonction de NL, il y a une augmentation entre 60 et 70% puis une stabilisation de l'épaisseur: pour t_{open} de 2 ms et NL de 70%, l'épaisseur moyenne est de $21 \pm 1 \mu\text{m}$ et pour t_{open} de 2 ms et NL de 100%, l'épaisseur moyenne est de $22 \pm 1 \mu\text{m}$. Pour aller plus loin dans cette analyse, une étude du volume des gouttes en fonction de t_{open} et NL pourrait permettre de relier le débit de l'encre à travers la buse en fonction de ces paramètres.

II.5.1.2.f) Synthèse sur l'étude des paramètres d'impression des gouttes

Suite à cette étude sur les paramètres d'impression, une combinaison de paramètres pour assurer une éjection de goutte stable est proposée dans le Tableau 27.

Tableau 27 : Combinaison de paramètres d'impression de la tête Vermes pour une impression robuste (t_{ris} : temps de montée du piston, t_{open} : temps d'ouverture du piston, t_{fall} : temps de descente du piston, t_{delay} : temps entre deux séries de mouvements, NL : amplitude d'ouverture du piston, v_{print} : vitesse d'impression, d_{print} : distance d'impression entre la buse et le support)

Paramètres	t_{ris} (ms)	t_{open} (ms)	t_{fall} (ms)	t_{delay} (ms)	NL (%)	v_{print} (mm/s)	$d_{print}(\mu\text{m})$	Pression (bar)
Intervalle	0,4	1-8	<0,1	35	60-100	<100	320-4800	5
Valeurs optimales	0,4	2	0,07	35	80	35	1300	5

Une photo de gouttes imprimées avec ce jeu de paramètres est présentée en Figure II-35.



Figure II-35 : Gouttes imprimées avec la combinaison de paramètres pour une impression robuste (Tableau 27)

Les caractéristiques géométriques mesurées des gouttes imprimées avec ce jeu de paramètres sont présentées dans le Tableau 28. Ces mesures sont réalisées sur 2 séries (2 plaques distinctes) de 16 gouttes à température ambiante (environ 20°C).

Tableau 28 : Caractéristiques géométriques des gouttes avec la combinaison de paramètres pour une impression robuste

<i>Largeur moyenne (μm)</i>	<i>Longueur moyenne (μm)</i>	<i>Épaisseur moyenne (μm)</i>
647±24	659±21	21±1

II.5.1.3. Optimisation de l'impression de lignes

Les paramètres pour imprimer des gouttes uniformes ayant été déterminés, des lignes conductrices imprimées sont caractérisées. Dans cette partie, la superposition de gouttes (schématisée sur la Figure II-4) est mise en œuvre pour former des lignes. L'influence du recouvrement sur la longueur (OL_L) et la largeur (OL_w) de la piste est étudiée. Il s'agit d'analyser la géométrie de la ligne imprimée, et d'en déduire les paramètres pour obtenir une ligne ayant des bords les plus rectilignes.

II.5.1.3.a) Influence du recouvrement longitudinal (OLL) sur la largeur, l'épaisseur des pistes et la rugosité

Dans le Tableau 29, les paramètres d'impression des séries qui sont utilisées dans cette analyse sont présentés. Les séries S10 et S11 sont imprimées à basse vitesse (1 mm/s) pour observer l'impact sur la géométrie de la piste. Ces mêmes séries ont été imprimées avec des paramètres non-optimaux par rapport à ce qui a été défini dans le Tableau 27, car elles ont été imprimées avant ces conclusions. Elles sont, cependant, présentées pour donner un ordre de grandeur de l'impact de la vitesse sur le recouvrement.

Tableau 29 : Combinaison des paramètres d'impression du système Vermes des séries étudiées pour le recouvrement OLL

<i>Paramètres</i>	<i>t_{ris} (ms)</i>	<i>t_{open} (ms)</i>	<i>t_{fall} (ms)</i>	<i>NL (%)</i>	<i>v_{print} (mm/s)</i>	<i>Pression (bar)</i>	<i>d_{print} (μm)</i>
<i>Série 10-11</i>	0,4	0,5	0,07	70%	1	5	1300
<i>Série 15-22</i>	0,4	1	0,1	80%	35	5	1300

Dans une première approche qualitative, des photographies prises à la loupe binoculaire pour divers recouvrements sont présentées en Figure II-36. Le recouvrement est de plus en plus important et pour un recouvrement de 75% la largeur de la ligne augmente significativement. Les bords de la ligne semblent plus rectilignes à partir d'un recouvrement de 50%.

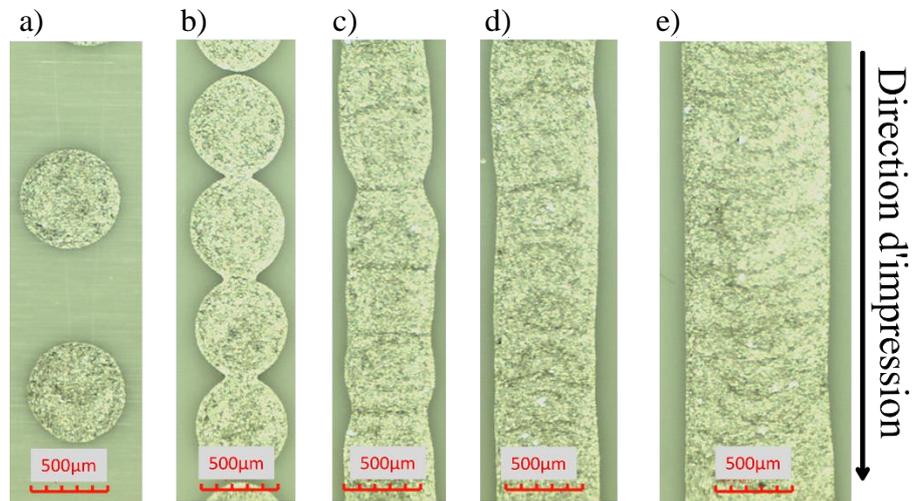


Figure II-36 : Photographies prises à la loupe binoculaire illustrant différents recouvrements a) gouttes indépendantes b) $OL_L=0\%$ c) $OL_L=25\%$ d) $OL_L=50\%$ e) $OL_L=75\%$

Dans le Tableau 30, les mesures des aires de sections pour les recouvrements 25%, 50% et 75% mesurés à l'interféromètre sont montrées. Plus le recouvrement augmente plus l'aire de la section augmente car la quantité de matière déposée à un même endroit est plus importante pour un recouvrement élevé.

Tableau 30 : Profil et aire de la section de lignes imprimées en fonction de leur recouvrement OL_L

Recouvrement OL_L (%)	Profil	Aire (μm^2)
25		8806
50		13532
75		18802

Dans un première approche de mesure des largeur de lignes imprimées, un programme python réalisé précédemment dans le cadre de la Chaire MINT [68], permet de calculer cette rectitude. Le schéma de principe est montré en Figure II-37. Une photographie de la piste est

binarisée manuellement par le logiciel Imagej puis est entrée dans le programme. Cela permet de pouvoir détecter aisément les bordures. Les coordonnées de la bordure sont enregistrées puis un ajustement de ces coordonnées est réalisé pour obtenir une bordure idéale droite. La hauteur de différence entre la bordure idéale et la bordure réelle définit l'écart type (flèches rouges sur la Figure II-37) et donc la rectitude de la ligne : plus l'écart est petit, plus la bordure de la ligne imprimée est proche de la bordure idéale.

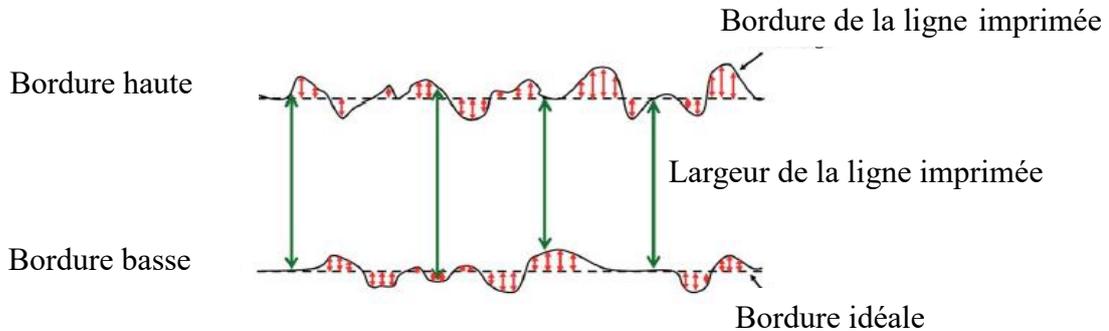


Figure II-37 : Schéma de principe permettant de renseigner le programme python pour calculer la rectitude d'une ligne (adapté de [68])

Dans le Tableau 31, le résultat de l'analyse de ces photographies est détaillé pour 25%, 50% et 75% de recouvrement. Ces mesures sont réalisées sur une photographie pour chaque recouvrement. L'écart type diminue lorsque le recouvrement augmente, la rectitude est améliorée à partir de 50% de recouvrement.

Tableau 31 : Largeur moyenne de lignes imprimées calculée pour $OL_L=25\%$, 50% et 75% avec les paramètres de la tête d'impression Vermes donnés dans le Tableau 29

OL_L	25%	50%	75%
Largeur moyenne calculée (μm)	555±43	667±14	938±12

Sur la Figure II-38a), la largeur de la piste en fonction du recouvrement longitudinal OL_L est présenté. Chaque point est une moyenne et un écart type de 12 mesures. Pour un recouvrement de 0% seule la section la plus large est mesurée. La première partie du graphique, « discontinue » montre les mesures de gouttes isolées, à partir de 25% la ligne devient continue car les gouttes sont jointives. On n'observe pas de majeure différence entre les 2 vitesses. Les mesures des 4 séries suivent une courbe de tendance exponentielle. Les largeurs varient de 574 μm à 984 μm pour des recouvrements augmentant de 25 à 75%.

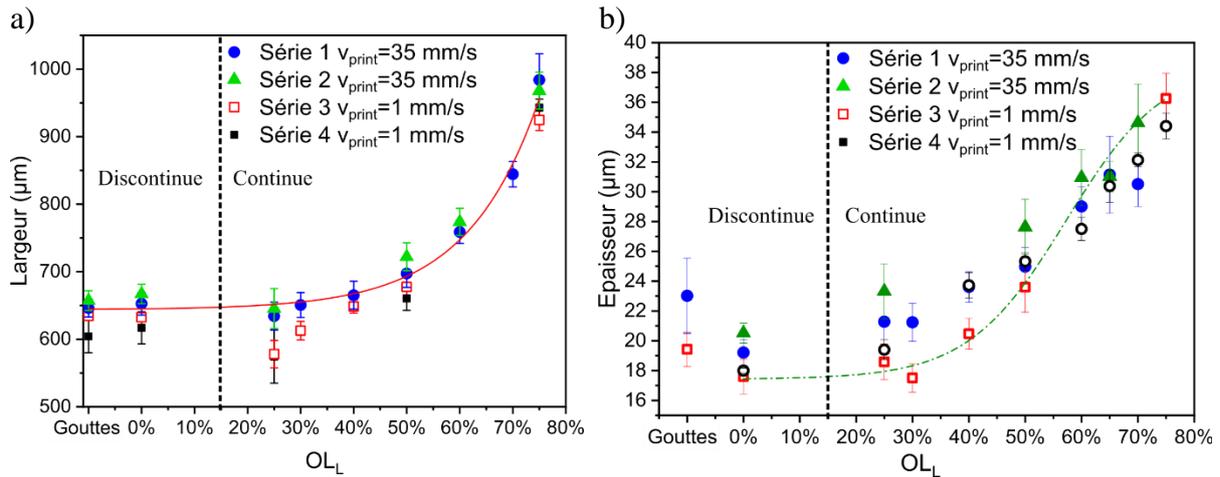


Figure II-38 : Influence de la vitesse d'impression en fonction du recouvrement longitudinal sur a) la largeur de la piste b) l'épaisseur de la piste

Sur la Figure II-38b) les mesures d'épaisseur en fonction du recouvrement sont présentées. Chaque point est une moyenne et un écart type de 8 mesures. Les épaisseurs varient de 20 à 36 μm pour des recouvrements augmentant de 25 à 80%. Ces augmentations de largeur et d'épaisseur quand le recouvrement longitudinal, OL_L , augmente sont causées par l'accumulation de matière plus importante en un même point, puis un étalement de cette matière. Pour un recouvrement de 50% la ligne présente une largeur moyenne mesurée de $689 \pm 27 \mu m$, ce qui rejoint le résultat trouvé par le programme python de $667 \pm 14 \mu m$.

La rugosité est mesurée pour 4 recouvrements OL_L comme montré dans le Tableau 32. Elles sont réalisées avec un interféromètre, pour chaque recouvrement 4 échantillons sont mesurés. La rugosité évolue peu en fonction du recouvrement OL_L : il y a 0.16 μm de différence entre un recouvrement de 40% et 75%.

Tableau 32 : Rugosité en fonction du recouvrement OL_L

Recouvrement OL_L (%)	40	50	60	75
Ra (μm)	$1,08 \pm 0,05$	$1,27 \pm 0,03$	$1,41 \pm 0,13$	$1,24 \pm 0,04$

Pour conclure sur cette étude du recouvrement longitudinal :

- A partir de 50% de recouvrement la ligne présente des bords parallèles à $\pm 14 \mu m$ (Tableau 31)
- Pour un recouvrement de 50% la ligne présente une largeur moyenne mesurée de $689 \pm 27 \mu m$ et une épaisseur de $25 \pm 2 \mu m$ (Figure II-38).
- Une ligne formée par un recouvrement à 50% a une rugosité de $1,27 \pm 0,03$

II.5.1.3.b) Influence du recouvrement longitudinal (OLL) et latéral (OLW) sur la largeur et l'épaisseur des pistes

Pour pouvoir augmenter la largeur de ligne, le recouvrement latéral OLW doit être utilisé en complément du recouvrement longitudinal. Autant de lignes que nécessaires peuvent être

ajoutées pour atteindre la largeur voulue. Cette technique de recouvrement pourra aussi être utilisée pour réaliser des plans de masse. La combinaison de paramètres utilisée pour chaque série est détaillée dans le Tableau 33. Pour toute cette étude : $OL_L=OL_W$ pour plus de simplicité.

Tableau 33 : Combinaison des paramètres d'impression de la tête Vermes des séries étudiées pour le recouvrement OL_W

Paramètres	t_{ris} (ms)	t_{open} (ms)	t_{fall} (ms)	NL (%)	v_{print} (mm/s)	Pression (bar)	d_{print} (μm)
Série 18ab	0,4	1	0,1	80	35	5	1300

La Figure II-39 présente un recouvrement latéral et longitudinal de 0 à 75%. Pour les valeurs en dessous de 40% qualitativement, les bordures ne sont pas rectilignes.

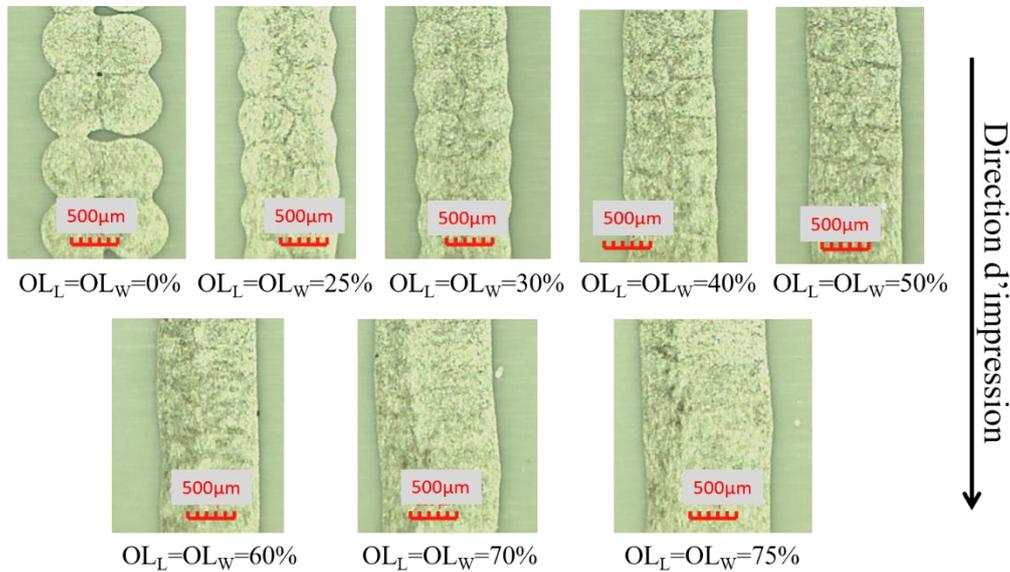


Figure II-39 : Photographies du recouvrement latéral et longitudinal de 0% à 75%

De la même manière que pour le recouvrement longitudinal, les photographies prises pour différents recouvrements sont utilisées dans le programme python. Les résultats sont présentés dans le Tableau 34. L'écart type est minimum pour un recouvrement de 50%, la rectitude des bordures de lignes est donc maximisée pour cette valeur.

Tableau 34 : Largeur moyenne de lignes calculée pour différents recouvrements latéraux avec $OL_L=OL_W=25\%$, 50% et 75%

OL_L et OL_W	25%	50%	75%
Largeur moyenne calculée (μm)	975±43	958±21	1334±36

La Figure II-40a) présente la largeur de la ligne en fonction du recouvrement longitudinal et latéral. Chaque point est une moyenne et un écart type de 12 mesures réalisées à la loupe binoculaire. La largeur de la ligne diminue dans un premier temps de 1300 μm à 950 μm (minimum) car les deux lignes recouvertes se rapprochent, puis la largeur augmente de 950 μm à 1390 μm , du fait de la quantité de matière importante déposée. Le minimum est atteint pour 40% de recouvrement avec une largeur de 950 μm .

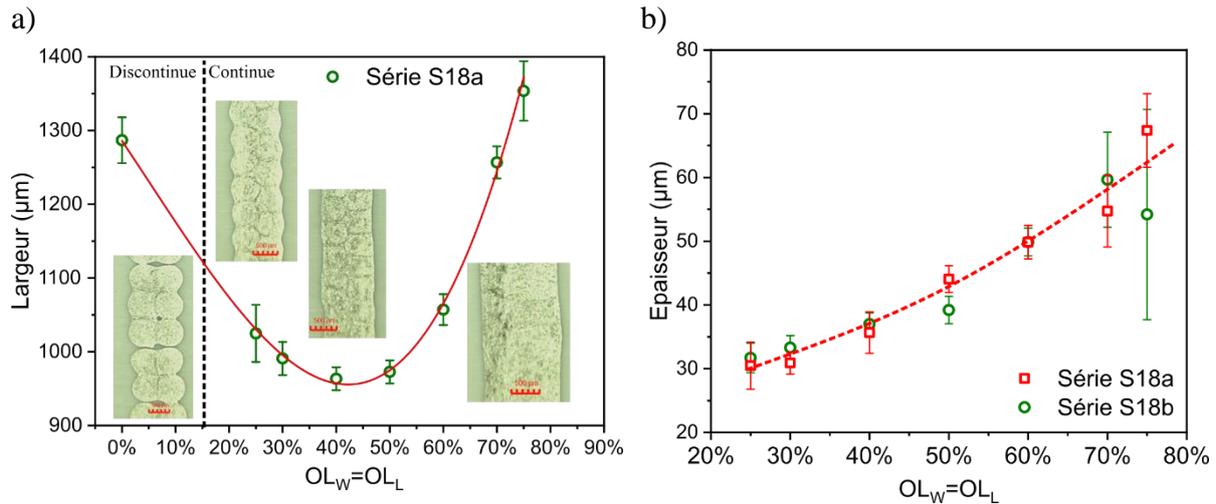
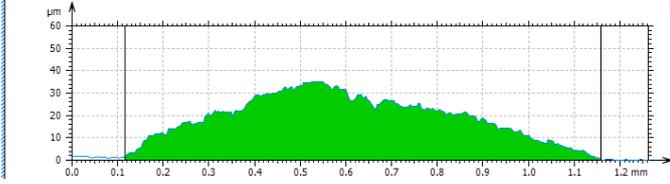
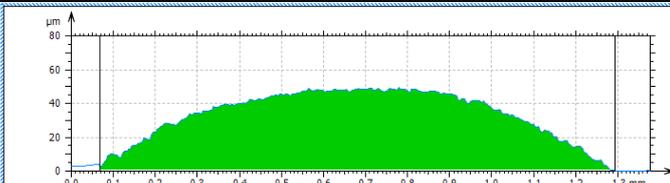


Figure II-40 : a) Largeur de la ligne en fonction du recouvrement ($OL_L = OL_W$) b) Epaisseur de la ligne en fonction du recouvrement ($OL_L = OL_W$)

Sur la Figure II-40b) l'épaisseur de la ligne en fonction du recouvrement longitudinal et latéral est présentée. Pour chaque point du graphique, une moyenne et un écart type est calculé pour 4 mesures. L'épaisseur augmente avec le recouvrement car la quantité de matière est de plus importante. L'écart type augmente fortement à partir de 70% de recouvrement, cela est causé par la rugosité de la ligne. Un recouvrement est nécessaire pour obtenir des lignes rectilignes correctement définies cependant celui-ci doit être compris entre 50% et 70% pour conserver une qualité d'impression optimale.

Dans le Tableau 35, les profils et aire de la section des lignes imprimées avec un recouvrement OL_L et OL_W sont présentés. Le profil de 25% montre une largeur plus importante que le profil 50% pour une aire de section plus petite, ce qui illustre la courbe présentée sur la Figure II-40. Le profil et l'aire pour un recouvrement de 75% montre également un élargissement et un épaissement par rapport au recouvrement de 50%.

Tableau 35 : Profil et aire de la section de lignes imprimées en fonction de leur recouvrement OL_L et OL_W

Recouvrement $OL_L=OL_W$ (%)	Profil	Aire (μm^2)
25		19642
50		26314
75		39978

La Figure II-41 présente la topographie des lignes imprimées avec un recouvrement latéral et longitudinal. A 75% les jointures entre les gouttes ne sont plus visibles en revanche des rugosités importantes apparaissent dues à un excès de matière par superposition des gouttes.

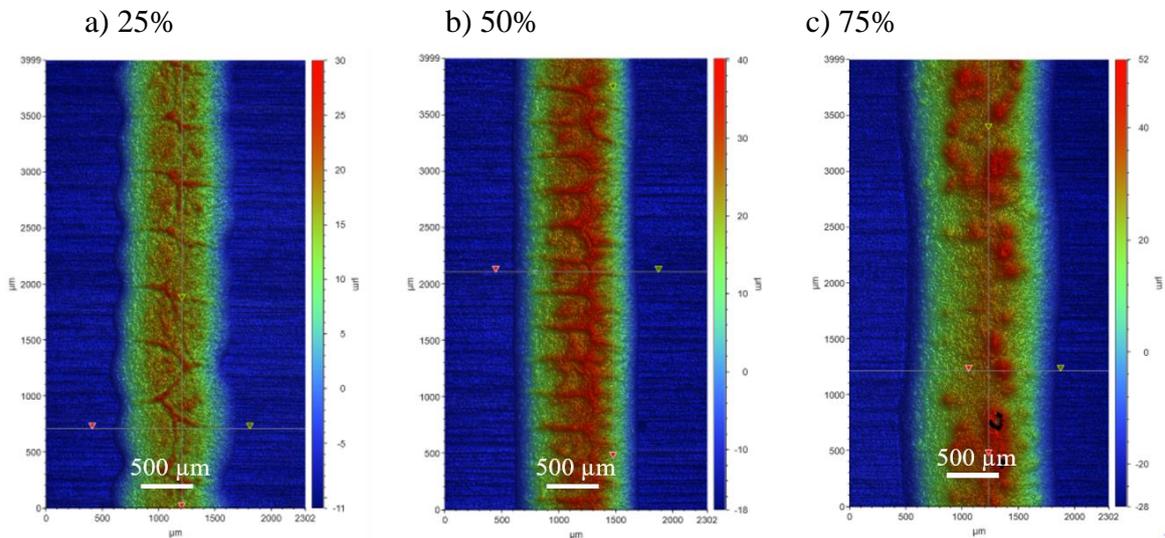


Figure II-41 : Topographie de lignes imprimées avec des recouvrements de gouttes pour $OL_L=OL_W$ a) 25% b) 50% c) 75%

Afin de réaliser des pistes conductrices, il est important de pouvoir maîtriser la largeur de la piste imprimée. Pour une superposition verticale et horizontale des gouttes de 50%, l'équation suivante permet d'estimer la largeur de la piste obtenue (W_{theo}) :

$$W_{theo} = W_{50\%} + N \cdot \frac{W_{50\%}}{2} \quad (II.5)$$

Avec

- W_{theo} la largeur théorique calculée (μm)
- $W_{50\%}$ la largeur mesurée d'une ligne de recouvrement longitudinal 50% soit $689 \mu\text{m}$ déterminé dans le paragraphe II.5.1.3.a).
- N le nombre de lignes superposées

Dans le Tableau 36, des largeurs mesurées avec recouvrement latéral et longitudinal (à 50%) sont récapitulées ainsi que leur valeur théorique. Les valeurs théoriques sont plus importantes que les valeurs mesurées sauf pour la superposition de 7 et 3 lignes. En revanche l'erreur relative est faible (en dessous de 6%). Cette erreur pourrait être causée par une température plus faible au moment de l'impression de ces lignes qui a pu légèrement changer la viscosité de l'encre sur le substrat.

Tableau 36 : Comparaison des largeurs mesurées et théorique (Equation (II.5)) des pistes imprimées avec la tête d'impression Vermes pour les paramètres donnés dans le Tableau 33 et avec un recouvrement $OL_L = OL_W = 50\%$

Nombre de lignes	2	3	4	5	6	7	8
Largeur mesurée (μm)	992±23	1393±51	1676±46	1949±8	2302±2	2832±28	2996±32
Largeur théorique (μm)	1034	1378	1722	2067	2411	2756	3100
Erreur relative (%)	4	1	3	6	5	3	3

Pour conclure cette analyse sur le recouvrement latéral et longitudinal réalisé avec les paramètres donnés dans le Tableau 33 :

- Le recouvrement de 50% permet d'assurer une ligne rectiligne
- Au-delà de 70% la ligne devient rugueuse et non rectiligne

II.5.1.3.c) Influence du recouvrement longitudinal sur la conductivité

Après avoir déterminé les paramètres d'impression d'une ligne, il est nécessaire de connaître la conductivité des pistes afin de pouvoir simuler des prototypes pour les basses et hautes fréquences.

4 séries de lignes sont imprimées pour les recouvrements 25%, 30%, 40%, 50%, 60%, 65%, 70% et 75%. Les séries 1,2 et 3 sont imprimées avec un recouvrement longitudinal uniquement (ligne simple). La série 4 est imprimée avec un recouvrement longitudinal et latéral

égaux. La conductivité est mesurée avec la technique 4 fils comme expliqué dans la partie II.5.1.1.b).

L'écartement entre les pointes de mesure est déterminé avec un réglet. Le courant imposé par le générateur est de 130 mA. La section de la ligne est mesurée avec l'interféromètre. La conductivité peut ainsi être calculée. La difficulté est la variation importante de section dans les lignes imprimées comme montré en Figure II-42 : pour cela, un calcul d'incertitude pour un niveau de confiance de 95% a été réalisé (Annexe F). La section représente la part la plus importante dans les incertitudes (4 fois plus que les mesures de résistance).

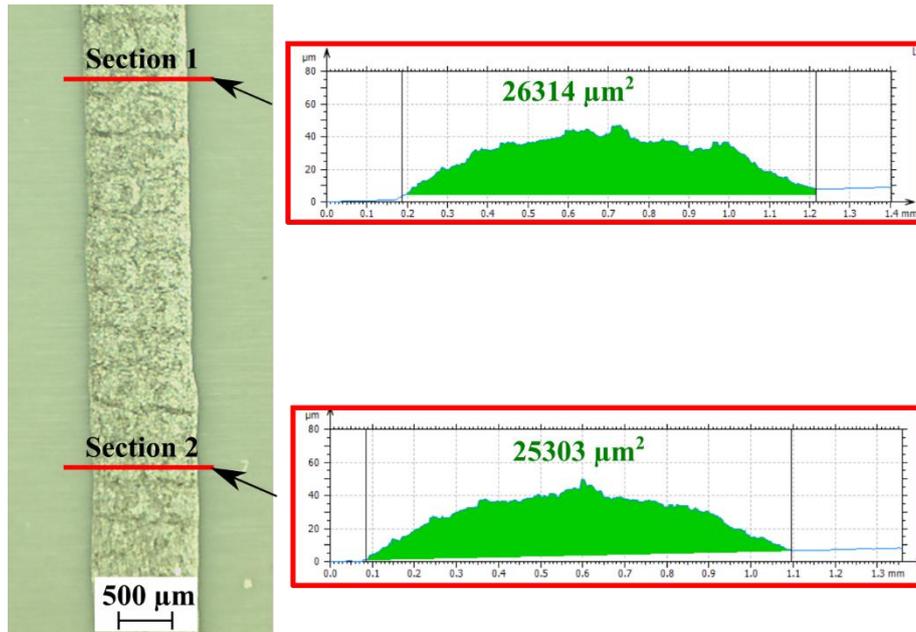


Figure II-42 : Exemple de sections irrégulières sur une ligne imprimée

Les résultats de cette étude sont présentés sur la Figure II-43. En moyenne, sur ces 4 séries, une conductivité de $2,95 \pm 0,24 \times 10^6$ S/m est calculée (équation (II.4)). Cette valeur devrait rester constante en fonction du recouvrement OL_L car la conductivité est une propriété intrinsèque du matériau obtenu après recuit. La grande dispersion des valeurs obtenues pour OL_L de 25% s'explique principalement par une variation importante de la section qui augmente l'erreur.

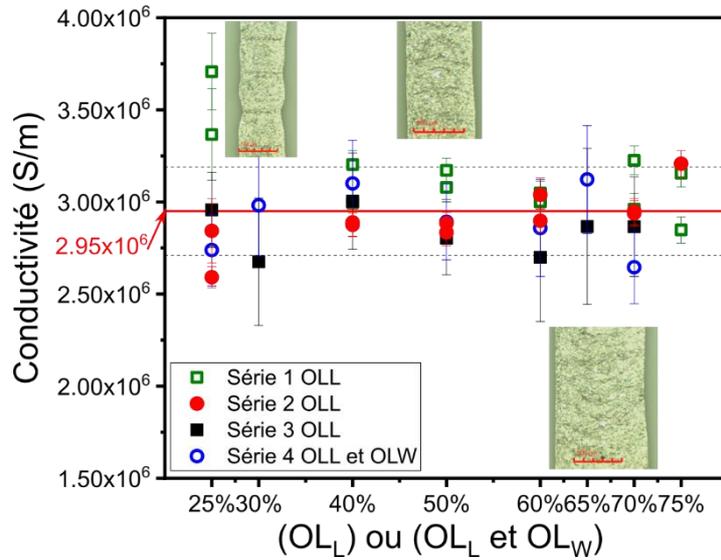


Figure II-43 : Conductivité des lignes en fonction du recouvrement, longitudinal et latéral, des gouttes imprimées avec la tête Vermes (séries 1, 2 et 3 : recouvrement longitudinal uniquement, série 4 : recouvrement longitudinal et latéral)

Afin de pouvoir comparer ce résultat à la résistance carrée (R_s) donnée par le fabricant de l'encre utilisée, la formule suivante est appliquée :

$$R_s = \frac{1}{\sigma \cdot t} \quad (II.6)$$

Avec

- R_s la résistance carrée (Ω/sq)
- σ la conductivité (S/m)
- t l'épaisseur de la couche mesurée (m)

Ainsi, une résistance carrée de $13,6 \pm 2,6 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ est calculée pour une épaisseur de $25,5 \pm 5,0$. Le fabricant annonce une résistance carrée de $30 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ pour $25 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Ainsi, pour une épaisseur similaire la résistance des pistes est 2,2 fois moins élevée que celle donnée par le fabricant.

II.5.1.3.d) Conclusion sur l'étude des paramètres d'impression des lignes

Ces études ont montré que pour imprimer une ligne avec une haute définition et une qualité d'impression maximisée, il est préférable d'utiliser un recouvrement longitudinal d'au moins 50% pour une ligne simple. Pour une ligne formée de plusieurs lignes superposées, il est recommandé d'utiliser des recouvrements longitudinaux et latéraux compris entre 50% et 70% afin d'éviter une accumulation de matière trop importante qui augmente la rugosité. Les paramètres d'impression optimaux de la tête Vermes qu'il est préférable d'utiliser sont mentionnés dans le Tableau 27.

Les caractéristiques géométriques des lignes imprimées sont résumées dans le Tableau 37. Les résultats présentés sont des moyennes et écarts types des mesures de cette étude.

Le cuivre est l'un des métaux couramment utilisé pour l'électronique sur les PCB et notamment pour les dispositifs RF. Sa conductivité de 59×10^6 S/m est 20 fois supérieure à celle d'une piste imprimée avec une encre argent. Ce paramètre est important à prendre en compte pour la conception des circuits électroniques et radiofréquences.

Tableau 37 : Caractéristiques géométriques et conductivité associée de pistes conductrices imprimées par la tête Vermes avec les paramètres d'impression donnés dans le Tableau 27

<i>Paramètres</i>	<i>Largeur moyenne (μm)</i>	<i>Épaisseur moyenne (μm)</i>	<i>Conductivité (S/m)</i>	<i>Illustration</i>
<i>Recouvrement longitudinal $OL_L=50\%$</i>	689±27	25±2	$2,9 \pm 0,2 \times 10^6$	
<i>Recouvrement longitudinal et latéral $OL_L = OL_W = 50\%$</i>	973±16	39±2	$2,9 \pm 0,2 \times 10^6$	

Ainsi, des lignes peuvent être imprimées avec un procédé robuste. Ces résultats permettent de dimensionner des dispositifs pour les simulations. C'est également une base importante pour la caractérisation radiofréquence.

II.5.2. Stratégies dynamiques d'impression pour améliorer la qualité des pistes imprimés

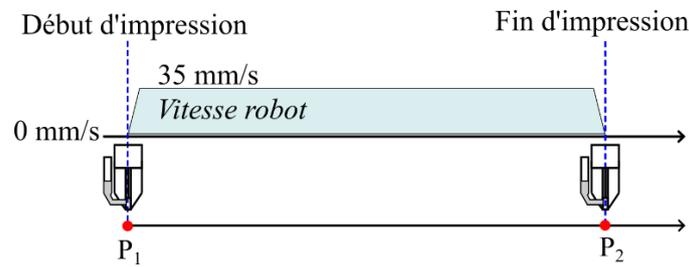
II.5.2.1. Améliorations apportées pour l'impression de lignes droites

Après avoir déterminé le jeu de paramètres pour une impression robuste, quelques défauts liés au mouvement robotique 6 axes peuvent être minimisés. Pour les lignes droites, le principal défaut apparaît en début et fin de lignes imprimées.

En Figure II-44a), la trajectoire d'impression basique est décrite : le point P_1 est le point de départ de la trajectoire et le point de démarrage de l'impression, le point P_2 est le point d'arrêt de la trajectoire et le point d'arrêt de l'impression. La rampe de vitesse du robot est également illustrée de 0 à 35 mm/s. Ainsi, lors de cette accélération après le point P_1 puis cette décélération avant le point P_2 , la variation de vitesse conduit à une variation du recouvrement (plus

important) au début et à la fin de l'impression. En Figure II-45a) une illustration de ce phénomène est présentée : la section finale est plus importante que le reste de la ligne.

a)



b)

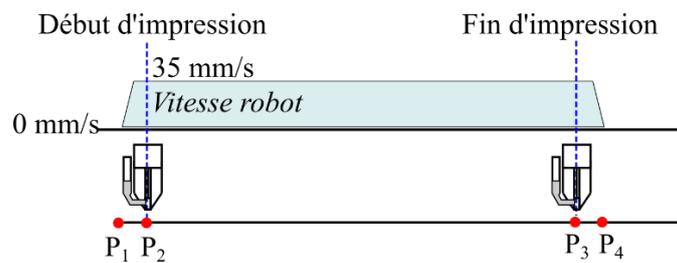
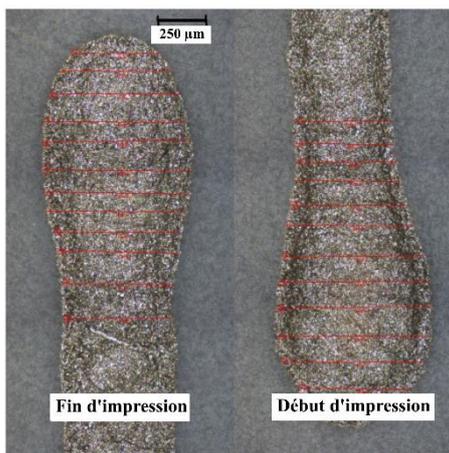


Figure II-44 : Différentes stratégies d'impression pour améliorer la qualité des pistes imprimées a) arrêt de la trajectoire et arrêt de l'impression en même temps b) arrêt de la trajectoire décalé par rapport à l'arrêt de l'impression

Une proposition d'amélioration de cette première stratégie est présentée sur la Figure II-44b). Dans cette configuration, le point P1 est le départ de la trajectoire et le point P2 le début de l'impression (éjection d'une goutte). De la même façon le point P3 est la fin de l'impression (arrêt de l'éjection de gouttes) et le point P4 la fin de la trajectoire. Ainsi, le début et la fin de l'impression se déroulent à vitesse constante, il n'y a donc pas de modification du recouvrement. En Figure II-45b), la fin de ligne ne présente plus de surplus de matière.

a)



b)

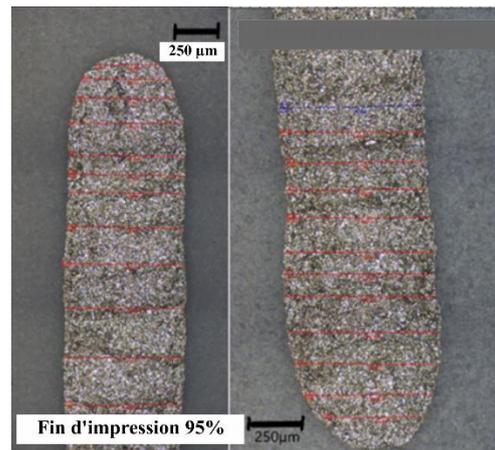


Figure II-45 : a) Début et fin de ligne sans optimisation b) début et fin de ligne avec optimisation

II.5.2.1. Améliorations apportées pour l'impression d'angles

Pour des trajectoires nécessitant par des angles, ce même problème persiste car il y a un ralentissement de la vitesse du robot pour aborder le changement de direction. Sur la Figure II-46, une illustration du phénomène est présentée. La largeur est plus importante au niveau du coin (de $731\ \mu\text{m}$ à $1022\ \mu\text{m}$).

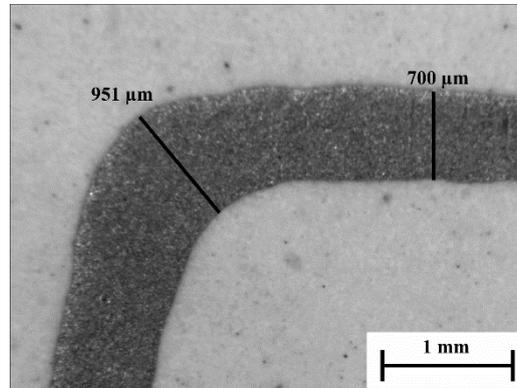


Figure II-46 : Photographie illustrant l'impression d'un angle et la variation dimensionnelle de la piste lors du passage de cette singularité

Afin de caractériser le ralentissement du robot, le phénomène est visualisé pour l'impression des gouttes isolées. Sur la Figure II-47, une impression de gouttes avec une trajectoire en zigzag (sans OL_w) est réalisée. Il est alors possible de mettre en évidence la différence de vitesse entre la section rectiligne et non rectiligne.

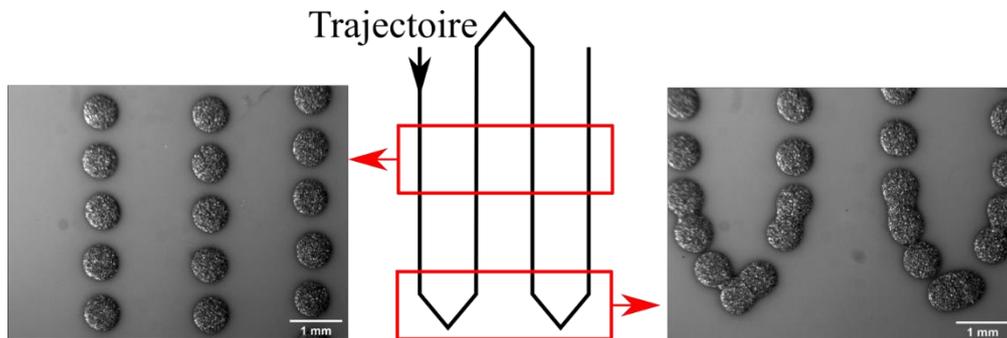


Figure II-47 : Trajectoire avec angle et illustrations de la section droite et courbé

Ces défauts peuvent être critiques pour certaines applications à haute fréquence où la forme du dispositif doit être particulièrement maîtrisée.

Dans l'étude suivante, il est montré que le lissage du robot sur les angles imprimés peut améliorer la qualité de l'angle. Le lissage, exprimé en mm, définit le moment où le robot quitte sa trajectoire rectiligne et rejoint la nouvelle lors du passage d'un angle comme montré sur la Figure II-48.

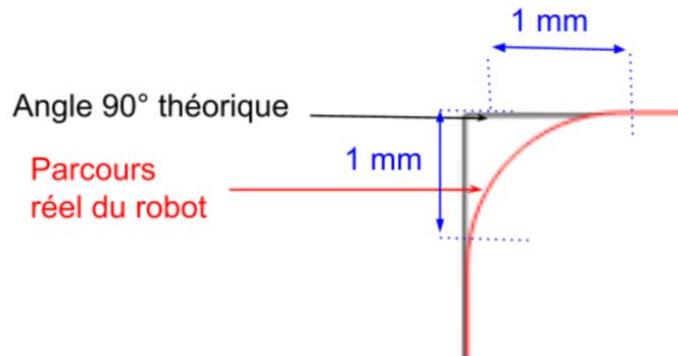


Figure II-48 : Schéma de principe illustrant un lissage de 1 mm pour le passage d'un angle droit

Quatre lissages différents ont été analysés pour un même angle de 90° : 0,1, 0,5, 1 et 1,5 mm. Les mesures de largeur sont réalisées en traçant un arc de cercle sur la bordure extérieure (Arc₁) et un arc de cercle sur la bordure intérieure (Arc₂). Il est ainsi possible d'en déduire la largeur de la piste dans l'angle (Figure II-49a)). Pour chaque lissage, trois angles sont imprimés. 5 mesures sont effectuées pour chaque paramètre.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 38. Lorsque le lissage augmente, l'écart de largeur sur la ligne rectiligne et au passage de l'angle augmente de 25% à 40%. Il est préférable d'utiliser une valeur de lissage faible afin de limiter cet écart. Le lissage est fixé à 0,1 mm pour le reste du travail.

Tableau 38 : Largeur de lignes en partie rectiligne et au passage de l'angle pour différents lissages

Lissage (mm)	0,1	0,5	1	1,5
Largeur de ligne - partie rectiligne (µm)	728±64	671±25	675±25	573±20
Largeur de ligne – dans l'angle (µm)	910±48	937±13	947±23	787±19
Ecart en %	25	40	40	37

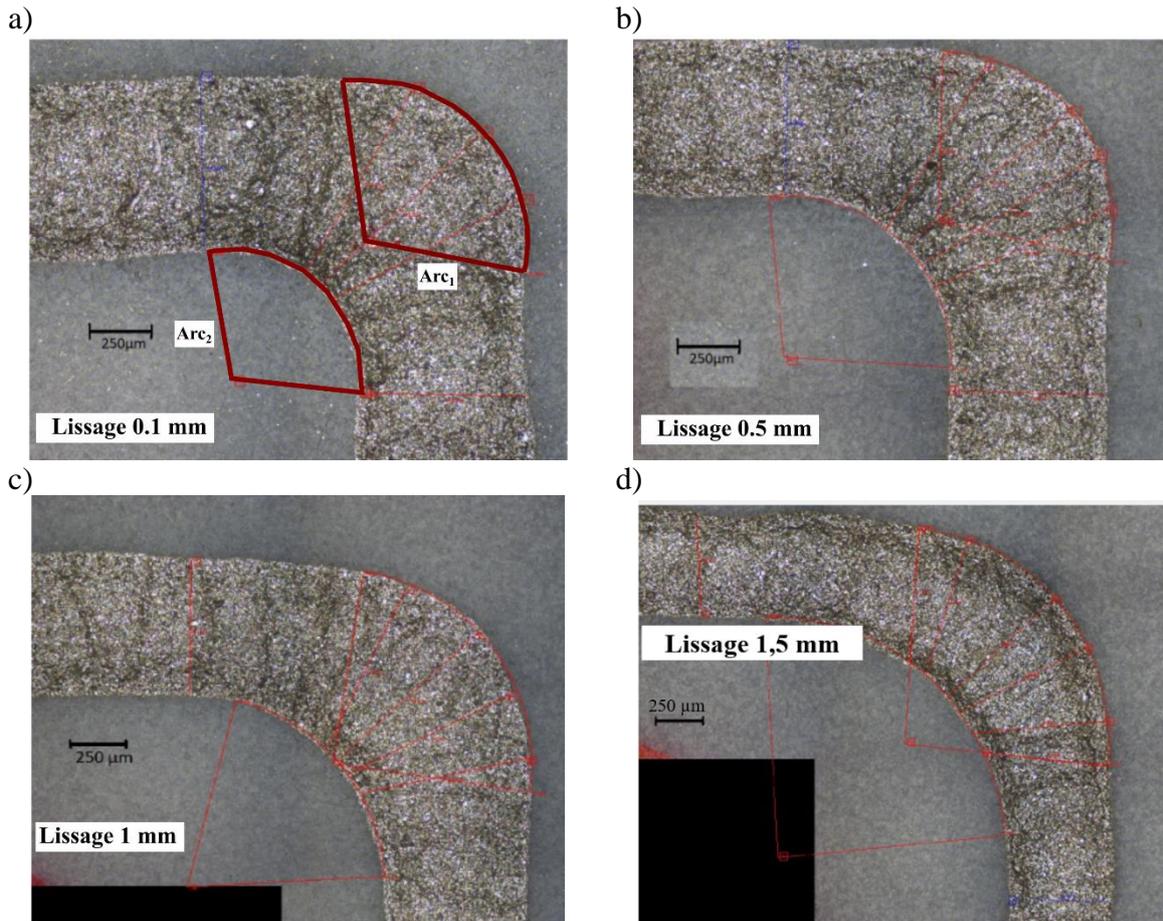


Figure II-49 : Photographies des lignes imprimées au passage des angles avec les lissages a) 0,1 mm b) 0,5 mm c) 1 mm d) 1,5 mm

II.5.2.2. Améliorations apportées pour l'impression d'aplat

Les applats sont principalement utilisés comme plan de masse, éléments de base pour des applications radiofréquences.

Tout d'abord, pour réaliser un aplat, il est nécessaire d'avoir un recouvrement latéral (OL_w) pour élargir la ligne d'impression. Il existe plusieurs solutions pour réaliser ce recouvrement de manière efficace. Pour l'impression avec un système d'impression Vermes, les critères de sélection de cette stratégie d'impression sont les suivants :

- Pas d'arrêt et de reprise de l'impression car cela ralentit le procédé
- La trajectoire assure le plus de fluidité possible aux mouvements du robot, c'est-à-dire assure le plus possible une vitesse constante

Sur la Figure II-50, des stratégies d'impression issue de la littérature de l'impression 3D FDM (Fused Deposition Material) sont présentées [141,142]. En effet, en impression 3D, le but est également de remplir le plus efficacement possible des surfaces.

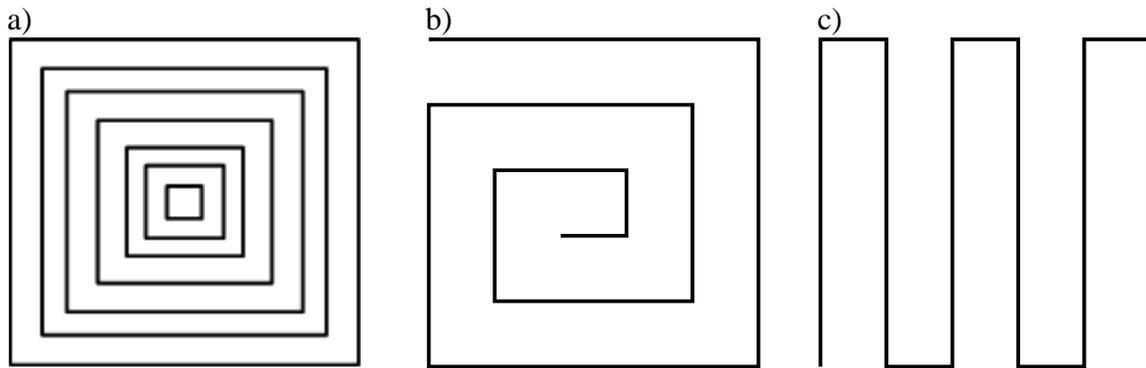


Figure II-50 : Différentes stratégies de trajectoires pour l'impression d'aplat a) Trajectoire en répétition de contours b) Trajectoire en spirale c) Trajectoire en zigzag

La trajectoire en répétition de contours (Figure II-50a)) combine les deux difficultés : arrêt et redémarrage de l'impression entre chaque contour et difficulté d'impression pour les carrés les plus petits.

La trajectoire en spirale (Figure II-50b)) permet de réaliser un aplat sans arrêt et redémarrage de l'impression. En revanche au centre de la spirale, les sections se font de plus en plus courtes et créent des changements de direction forts ce qui n'assure pas la continuité de la vitesse du robot.

La trajectoire en zigzag (Figure II-50c)) permet d'imprimer sans arrêt de l'impression et avec un motif similaire donc en minimisant les discontinuités de vitesse mais présente de forts et fréquents changements de direction.

La trajectoire zigzag a été légèrement modifiée en l'adaptant comme présenté sur la Figure II-51a) pour minimiser la discontinuité de vitesse au niveau des jonctions des lignes. Pour cela, un point de plus a été ajouté pour lisser l'angle droit original en un arc de cercle. Sur la Figure II-51b) des ondulations sont visibles sur les bords de l'aplat, ainsi pour éviter ce phénomène un contour est ajouté à l'aplat pour lisser les bords (Figure II-51c).

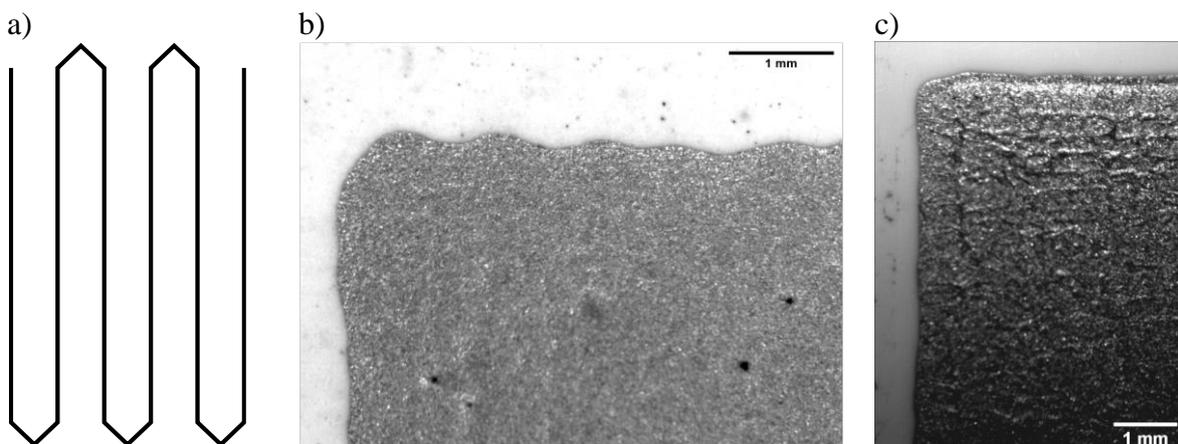


Figure II-51 : Stratégie d'impression d'un aplat avec le robot 6 axes a) Trajectoire d'impression b) Photographie d'un aplat imprimé sans contour c) avec contour

II.5.2.3. Synthèse des améliorations mises en œuvre

Concernant l'impression des lignes, les début et fin de lignes peuvent être améliorés en commençant l'impression (l'éjection des gouttes) et en terminant l'impression lorsque le système d'impression a atteint une vitesse constante. Cela permet d'éviter un surplus de matière au début et à la fin de la ligne, ce qui augmente la résolution des lignes imprimées.

Les défauts apparaissant lors de l'impression de lignes comportant un angle, peuvent être minimisés en choisissant un lissage des trajectoires du robot minimal. En utilisant un lissage de 0,1 mm, il est possible de réduire l'écart entre la partie rectiligne de la ligne et la partie angulaire de la ligne à 25%.

Pour l'impression des aplats, une stratégie basée sur les techniques utilisées par les imprimantes 3D est utilisée : l'impression en zigzag. Celle-ci est adaptée afin d'éviter les angles droits, ce qui permet de minimiser les discontinuités de vitesse. Un contour est ajouté ensuite à l'aplat afin d'éviter des ondulations sur les bords.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, l'objectif était de développer la méthode d'impression pour pouvoir imprimer des pistes avec une résolution optimale sur un substrat plastique.

Dans un premier temps, une combinaison de paramètres optimaux de la tête Vermes pour une impression robuste a été déterminée et est reportée dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Combinaison de paramètres d'impression de la tête Vermes pour une impression robuste (t_{ris} : temps de montée du piston, t_{open} : temps d'ouverture du piston, t_{fall} : temps de descente du piston, t_{delay} : temps entre deux séries de mouvements, NL : amplitude d'ouverture du piston, v_{print} : vitesse d'impression, d_{print} : distance d'impression entre la buse et le substrat)

Paramètres	t_{ris} (ms)	t_{open} (ms)	t_{fall} (ms)	t_{delay} (ms)	NL (%)	v_{print} (mm/s)	$d_{print}(\mu m)$	Pression (bars)
Intervalle	0,4	1-8	<0,1	35	60-100	<100	320-4800	5

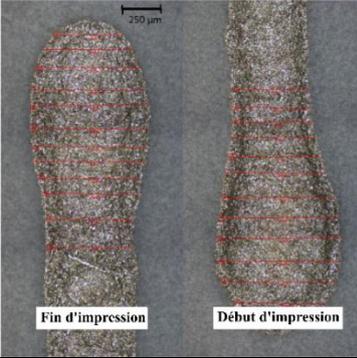
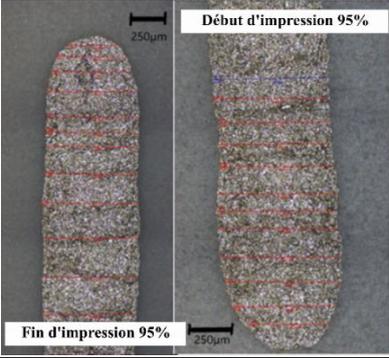
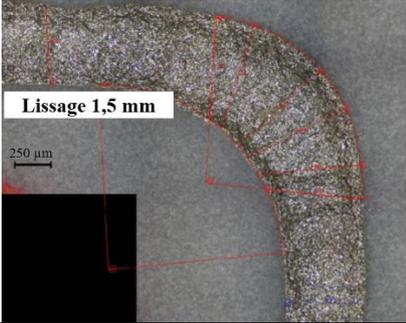
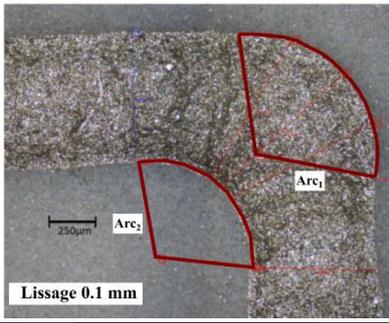
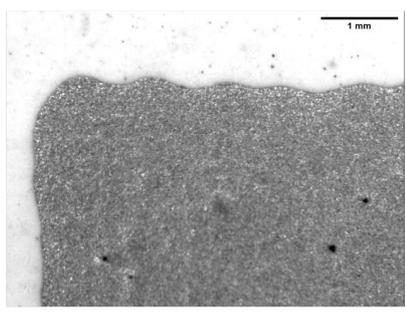
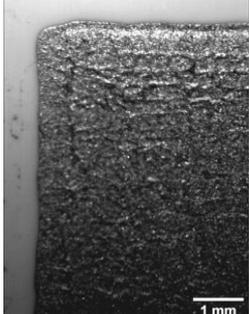
Ces paramètres du système d'impression permettent d'obtenir des gouttes et des lignes en superposant les gouttes longitudinalement (OL_L). Ces lignes peuvent être élargies en réalisant une superposition de lignes latéralement (OL_W). Il est préférable d'utiliser un recouvrement longitudinal d'au moins 50% pour une ligne simple. Pour une ligne formée de plusieurs lignes superposées, il est recommandé d'utiliser des recouvrements longitudinaux et latéraux compris entre 50% et 70% afin d'éviter une accumulation de matière trop importante qui augmente la rugosité. Les résultats de l'analyse des gouttes et des lignes sont synthétisés dans le Tableau 40.

Tableau 40 : Synthèse des résultats obtenue suite à l'analyse de l'impression de gouttes et de lignes (OL_L : superposition longitudinale de goutte, OL_W : superposition latérale de goutte)

	<i>Paramètres</i>	<i>Dimension moyenne (μm)</i>	<i>Epaisseur moyenne (μm)</i>	<i>Conductivité (S/m)</i>	<i>Illustration</i>
<i>Gouttes</i>	Tableau 27	Largeur : 665 ± 20 Longueur : 649 ± 22	34 ± 4	-	
<i>Lignes imprimées</i>	$OL_L=50\%$	Largeur : 689 ± 27	25 ± 2	$2,9 \pm 0,2 \times 10^6$	
	$OL_L=$ $OL_W=50\%$	Largeur : 973 ± 16	39 ± 2	$2,9 \pm 0,2 \times 10^6$	

Enfin, des stratégies pour améliorer la qualité des pistes imprimées en vue de réaliser des dispositifs radiofréquences sont mises en œuvre. Celles-ci sont synthétisées dans le Tableau 41.

Tableau 41 : Synthèse des stratégies pour amélioration des impressions

	<i>Stratégie mise en place</i>	<i>Avant</i>	<i>Après</i>
<i>Début/ fin de ligne</i>	Démarrage et arrêt de l'impression à vitesse constante		
<i>Ligne avec angle</i>	Minimisation du lissage		
<i>Aplat</i>	Impression en zigzag avec contour		

Ainsi, le procédé d'impression sur robot 4 axes et sur robot 6 axes est opérationnel dans le but d'imprimer des dispositifs radiofréquences sur substrats plastiques 2D ou 3D.

Chapitre III: Caractérisation radiofréquence de dispositifs imprimés en jetting et exemples d'applications

III.1.	LIGNES DE TRANSMISSION COPLANAIRES	108
III.1.1.	<i>Lignes de transmission coplanaires en radiofréquence</i>	108
III.1.2.	<i>Modes de propagation dans les lignes coplanaires</i>	110
III.1.3.	<i>Modélisation d'une ligne de transmission</i>	111
III.2.	MATERIELS ET METHODES DE MESURES RADIOFREQUENCES	113
III.2.1.	<i>Matériel de mesures radiofréquences</i>	113
III.2.2.	<i>Méthode d'extraction des paramètres RLGC</i>	118
III.3.	CONCEPTION ET CARACTERISATION RADIOFREQUENCE DE LIGNES DE TRANSMISSION COPLANAIRES IMPRIMEES EN 2D	120
III.3.1.	<i>Conception des lignes de transmission coplanaires</i>	120
III.3.2.	<i>Caractérisation des lignes de transmission coplanaires imprimées</i>	128
III.4.	CARACTERISATION DE LIGNES DE TRANSMISSION COPLANAIRE SUR PLAN INCLINE	141
III.4.1.	<i>Contexte de l'étude</i>	141
III.4.2.	<i>Matériels et méthodes</i>	141
III.4.3.	<i>Résultats des mesures et de la modélisation</i>	142
III.5.	CONCEPTION ET CARACTERISATION DE LIGNES COPLANAIRES EN 3D	143
III.5.1.	<i>Contexte</i>	143
III.5.2.	<i>Réalisation du prototype en 3D</i>	144
III.5.3.	<i>Caractérisation du prototype en 3D</i>	148
III.6.	EXEMPLES D'APPLICATIONS DU PROCEDE D'IMPRESSION	153
III.6.1.	<i>Applications radiofréquences sur surface plane : antenne LoRa</i>	154
III.6.2.	<i>Applications radiofréquences sur surface complexe</i>	158
III.7.	CONCLUSION	164

Le procédé d'impression mis en œuvre dans cette thèse a été caractérisé dans le chapitre précédent. Dans ce chapitre, les potentialités d'utilisation de ce procédé pour fabriquer des dispositifs radiofréquences¹ (RF) performants sont évaluées dans un cadre défini volontairement simple (impression d'une encre sur un substrat donné). Ce cadre, même restreint décrit un cas classique de la plastronique et permet de déterminer les applications RF possibles avec cette technologie.

Dans une première partie, le format de la ligne de transmission coplanaire est choisi comme dispositif car elle représente le type de dispositif le plus simple afin de réaliser cette étude. Les modes de propagation de ce type de lignes sont explicités et les règles de conception en sont déduites. Les méthodes de mesure et d'extraction des paramètres S sont expliquées.

Dans une seconde partie, les lignes coplanaires sur substrat 2D sont simulées, imprimées et caractérisées. Une adaptation de ces lignes est également proposée en maillant les plans de masse afin d'économiser de l'encre et du temps d'impression.

Avant de commencer les impressions sur des surfaces 3D, il est également nécessaire d'évaluer si les impressions sur des surfaces non horizontales ont un impact sur le comportement radiofréquence d'un dispositif. Ainsi, des lignes de transmission coplanaires sont imprimées sur des surfaces horizontales et des surfaces inclinées pour pouvoir déterminer cet effet.

Dans une troisième partie, des lignes coplanaires sont imprimées et caractérisées sur des substrats 3D comportant un angle (90° et 130°) afin d'effectuer une analyse radiofréquence des structures 3D.

Enfin, deux applications sont présentées : une antenne LoRa en simulation et un radôme imprimé afin d'améliorer le gain d'une antenne 5G.

III.1. Lignes de transmission coplanaires

III.1.1. Lignes de transmission coplanaires en radiofréquence

Les ondes électromagnétiques peuvent se propager en espace libre, dans des câbles électriques, dans des guides d'onde (métallique ou diélectriques) ou dans des structures planaires. Pour chacun de ces environnements, plusieurs structures sont possibles, le but étant de propager l'onde électromagnétique de la source vers la charge.

Pour les technologies de type « circuits imprimés », les lignes de transmission micro-rubans (*microstrip* en anglais) sont principalement utilisées. Les lignes de transmission coplanaires (avec ou sans plan de masse) sont également utilisées [143–145]. Une vue en coupe des différentes structures de lignes de transmission est présentée en Figure III-1.

¹ Gamme de fréquence : 300 MHz à 300 GHz

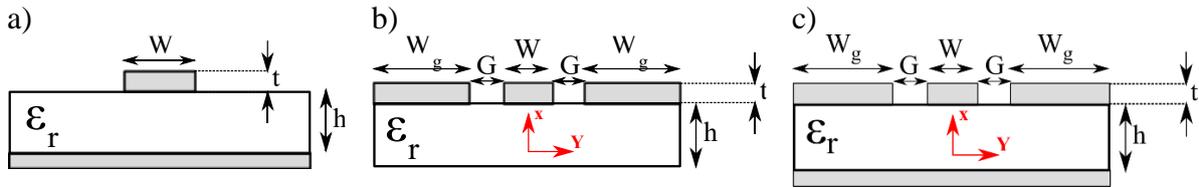


Figure III-1 : a) Structure d'une ligne de transmission micro-ruban b) Structure d'une ligne de transmission coplanaire (en gris les parties conductrices, en blanc le substrat isolant de constante diélectrique ϵ_r) c) Structure d'une ligne coplanaire avec plan de masse

La ligne micro-ruban (Figure III-1.a) a été proposée en 1969 par C. Wen [146]. Elle est constituée d'un ruban central métallique de largeur W et d'épaisseur t , séparé d'un plan métallique par une épaisseur h de substrat de permittivité ϵ_r . Le potentiel signal est appliqué sur le ruban central et le potentiel masse sur le plan métallique.

La ligne de transmission coplanaire [144] ou *coplanar waveguide* en anglais (Figure III-1.b) est constituée d'un ruban central de largeur W , de deux rubans latéraux et d'un substrat de permittivité ϵ_r . Les rubans latéraux sont séparés du ruban central par un écart G . Le dépôt métallique est d'épaisseur t . h est l'épaisseur du substrat de permittivité ϵ_r . Le potentiel signal est appliqué sur le ruban central et le potentiel masse sur les rubans latéraux. Les lignes de transmission coplanaires seront également appelées par l'acronyme CPW tout au long du manuscrit.

La ligne de transmission coplanaire avec plan de masse est une autre structure de ligne de transmission similaire à la ligne de transmission coplanaire avec un plan de masse sur la face arrière du substrat (Figure III-1.c).

Les lignes de transmission coplanaires sont des éléments de base pour la réalisation de filtres, de circuits d'adaptation d'impédance ou de résonateurs par exemple. En Figure III-2 une antenne alimentée par ligne coplanaire et un filtre avec des lignes coplanaires sont présentées.

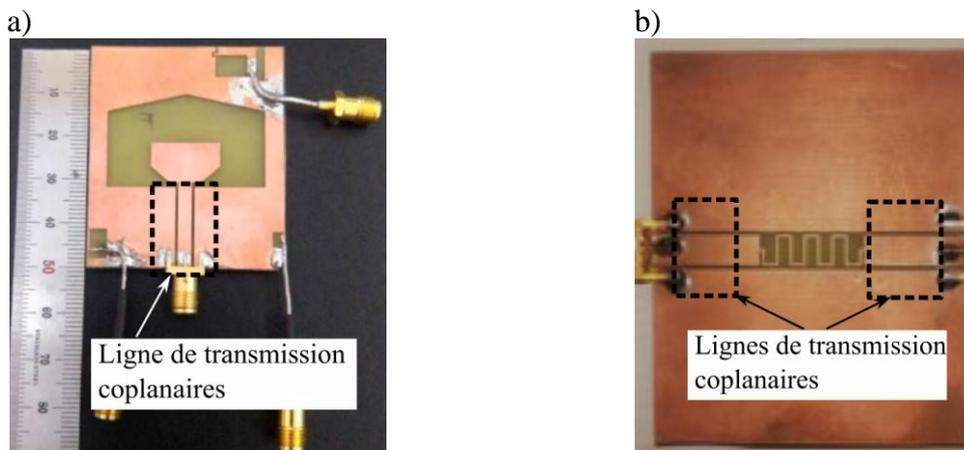


Figure III-2 : a) Antenne alimentée par l'intermédiaire d'une ligne coplanaire [147] b) Filtre coplanaire composé d'une ligne serpentin (meander line) et de lignes coplanaires [148]

Les lignes de transmission coplanaires sont bien adaptées à l'objectif de réaliser un dispositif de test pour évaluer les grandeurs qui caractérisent la transmission du signal au travers d'un motif imprimé. Les éléments des lignes coplanaires sont, de plus, situés sur une même

face ce qui facilite l'impression qui peut être réalisée en une fois. Ainsi, le choix se porte sur les lignes coplanaires pour étudier l'utilisation du procédé dans le domaine radiofréquence.

III.1.2. Modes de propagation dans les lignes coplanaires

Une onde électromagnétique est composée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{H} qui se propagent. L'expression mathématique de \vec{E} et \vec{H} est donnée ci-après :

- Le champ électrique $\vec{E} = [\vec{E}_t(x, y) + E_z(x, y)\vec{u}_z] e^{j(kz - \omega t)}$
- Le champ magnétique $\vec{H} = [\vec{H}_t(x, y) + H_z(x, y)\vec{u}_z] e^{j(kz - \omega t + \varphi)}$

Avec :

- E_t (V/m) et H_t (A/m) sont les composantes transversales du champ électrique et du champ magnétique
- E_z (V/m) et H_z (A/m) sont les composantes selon z du champ électrique et du champ magnétique
- ω la pulsation (rad.s⁻¹)
- \underline{k} le vecteur d'onde avec sa partie réelle en rad/m et sa partie imaginaire en Np/m
- t le temps (s)

Afin de dimensionner les CPW, une modélisation électromagnétique analogique ou numérique, tenant compte des propriétés physiques des matériaux les constituant, est nécessaire. Il est préférable de propager un mode dit transverse électromagnétique (TEM) ou quasi transverse électromagnétique (quasi TEM) dont le comportement est plus aisé à modéliser au moyen de circuit électrique. Cette méthode sera présentée dans le paragraphe III.1.3. La modélisation permet alors de réaliser des études prédictives et des études comparatives avec les mesures.

Le mode TEM avec propagation selon l'axe z est défini théoriquement par une composante nulle selon z pour les champs électrique et magnétique car ils sont transverses à la direction de propagation (équations de Maxwell). Cela se traduit par : $E_z=0$ et $H_z=0$. En toute rigueur, cela n'est possible que lorsque les conducteurs sont parfaits (c'est-à-dire de conductivité infinie). Mais, dans la plupart des cas, la conductivité des rubans et plans de masse est suffisamment élevée pour que cette hypothèse reste valable. De plus, lors de phénomènes de dispersion, dus au fait que les propriétés physiques de la ligne ne sont pas constantes selon la fréquence, une composante selon z apparaît et la propagation en mode TEM n'est plus respectée.

Afin d'éviter la dispersion due à des modes d'ordre supérieur (non TEM), il est nécessaire de respecter la condition « *Transversal Electric and Magnetic fields* » définie dans la référence [149]. L'équation suivante met en jeu la dimension d (2G+W) transversale de la ligne de transmission et les caractéristiques des matériaux constituant la structure :

$$d \ll \frac{1}{\omega \sqrt{\langle |\varepsilon(r)| \rangle \cdot \langle |\mu(r)| \rangle}} \quad (III.1)$$

Avec

- ω la pulsation des signaux en rad/s
- r le vecteur position dans le plan transverse (x,y)
- $\varepsilon(r)$ la permittivité complexe absolue
- $\mu(r)$ la perméabilité complexe absolue
- $||$ désigne le module
- $\langle \rangle$ désigne la valeur moyenne

III.1.3. Modélisation d'une ligne de transmission

Dans cette partie, la modélisation d'une ligne de transmission comme circuit électrique est décrite. Cette modélisation est valable en mode TEM ou quasi TEM seulement.

Un tronçon dx de ligne de transmission de longueur très inférieure à la longueur d'onde des signaux à propager est schématisé en Figure III-3. Ce circuit comporte :

- En série, une résistance $R \cdot dx$ et une inductance $L \cdot dx$ qui traduisent respectivement les pertes d'énergie active et réactive dans les conducteurs de la ligne
- En parallèle, une conductance $G \cdot dx$ et une capacité $C \cdot dx$ qui traduisent respectivement les pertes d'énergie active et réactive dans le diélectrique de la ligne

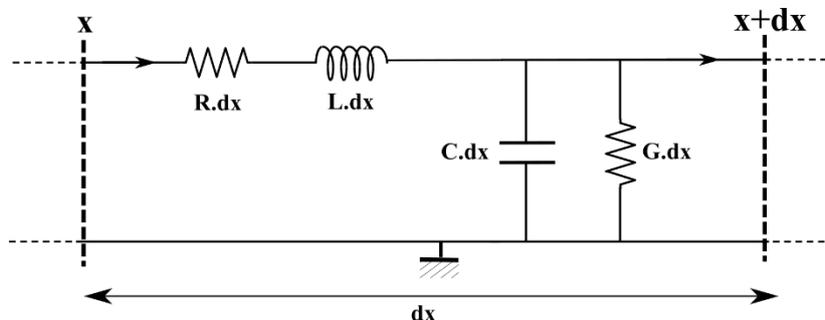


Figure III-3 : Schéma électrique d'un tronçon de ligne de transmission de longueur dx

$\underline{v}(x,t)$ et $\underline{i}(x,t)$ sont les valeurs complexes instantanées de la tension et du courant au point d'abscisse x . $\underline{V}(x)$ et $\underline{I}(x)$ sont les amplitudes complexes de la tension et du courant, dépendant uniquement de la variable spatiale x . En régime sinusoïdale la tension et le courant sont décrits comme :

$$\underline{v}(x,t) = \underline{V}(x)e^{j\omega t} \quad \text{Avec } \underline{V}(x) = V(x)e^{j\varphi_v(x)} \quad (III.2)$$

$$\underline{i}(x,t) = \underline{I}(x)e^{j\omega t} \quad \text{Avec } \underline{I}(x) = I(x)e^{j\varphi_i(x)} \quad (III.3)$$

Avec

- $V(x)$ et $I(x)$ sont les amplitudes réelles respectivement de la tension et du courant
- φ_v et φ_i les phases de la tension et du courant

- $\omega = 2\pi f$ la pulsation en fonction de la fréquence en rad/s

A partir du schéma de la Figure III-3, on peut établir les relations suivantes :

$$\frac{\partial \underline{v}}{\partial x} = -R\underline{i} - L \frac{\partial \underline{i}}{\partial t} \quad (III.4)$$

$$\frac{\partial \underline{i}}{\partial x} = -G\underline{v} - C \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} \quad (III.5)$$

Avec

- $\underline{v}(x,t)$ et $\underline{i}(x,t)$ les valeurs complexes instantanées de la tension et du courant au point x
- R la résistance linéique en ohm/m
- L l'inductance linéique en henry/m
- G la conductance linéique en siemens/m
- C la capacité linéique en farad/m

Les paramètres RLGC constituent les paramètres primaires de la ligne de transmission. En dérivant ces équations en fonction de dx et dt , les équations des télégraphistes sont obtenues :

$$\frac{\partial^2 \underline{v}}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 \underline{v}}{\partial t^2} - (RC + LG) \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} - RG\underline{v} = 0 \quad (III.6)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{i}}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 \underline{i}}{\partial t^2} - (RC + LG) \frac{\partial \underline{i}}{\partial t} - RG\underline{i} = 0 \quad (III.7)$$

En injectant les solutions du régime sinusoïdal (III.2) et (III.3), les équations (III.6) et (III.7) deviennent alors :

$$\frac{\partial^2 \underline{V}}{\partial x^2} = (R + jL\omega)(G + jC\omega)\underline{V} \quad (III.8)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{I}}{\partial x^2} = (R + jL\omega)(G + jC\omega)\underline{I} \quad (III.9)$$

γ la constante de propagation est posée telle que :

$$\gamma = \sqrt{(R + jL\omega) \cdot (G + jC\omega)} = \alpha + j\beta \quad (III.10)$$

Avec :

- α est la constante d'atténuation en Nepers (Np/m) ou décibel par mètre (dB/m). Ce paramètre permet d'évaluer l'atténuation de la ligne en fonction de la fréquence.
- β est la constante de phase en radians par mètre (Rad/m).

La vitesse de phase v_φ est la vitesse à laquelle se propage la phase de l'onde, elle est définie telle que : $v_\varphi = \frac{\omega}{\beta}$

L'impédance caractéristique Z_c de la ligne de transmission permet d'évaluer l'adaptation de la ligne aux autres éléments d'une chaîne de transmission RF. Il est préférable que cette adaptation soit proche de 50 ohms car, par convention, c'est également l'impédance des autres éléments (antennes, matériels de mesures, filtres...). L'impédance s'écrit comme le rapport entre l'impédance et l'admittance complexes :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}} \quad (III.11)$$

Z_c et γ constituent les paramètres secondaires de la ligne de transmission.

Dans le cas d'une ligne à minimisation de pertes, la condition de Heaviside [145] doit s'appliquer : $\frac{d\alpha^2}{dL} = 0$

La condition suivante en est déduite : $\frac{R}{G} = \frac{L}{C}$

Il vient alors :

$$\alpha = \sqrt{RG} \qquad \beta = \omega\sqrt{LC} \quad (III.12)$$

$$v_\varphi = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (III.13)$$

Si L et C sont constants, la vitesse de phase est indépendante de la fréquence : le signal se propage alors sans dispersion le long de la ligne [145].

Les paramètres primaires et secondaires des lignes de transmission ont été définis pour plusieurs cas. Ces paramètres permettent d'évaluer les performances d'une ligne de transmission qui véhicule des signaux RF. Dans les parties suivantes sont présentées les méthodes de mesures et d'extraction de ces paramètres.

III.2. Matériels et méthodes de mesures radiofréquences

III.2.1. Matériel de mesures radiofréquences

La mesure d'une ligne coplanaire se réalise à l'aide d'un VNA (Analyseur de réseaux vectoriel). Il est capable d'établir les paramètres S de réflexion et de transmission (voir Annexe A) grâce aux ondes électromagnétiques véhiculées qui transitent sur le dispositif sous test : la ligne de transmission. La connectique entre le VNA et la ligne peut s'effectuer principalement de deux manières : avec des connecteurs soudés sur le dispositif qui intègre la ligne ou en utilisant des sondes de mesure hyperfréquence. Pour des dispositifs imprimés, il n'est pas possible de réaliser une soudure facilement ainsi la mesure s'effectue avec des pointes RF.

La Figure III-4 schématise la pose des sondes sur une ligne coplanaire. Ces dernières sont équipées de 3 pointes de contact métalliques, la pointe centrale est dédiée au signal (S) et les pointes latérales à la masse (G). Elles transfèrent les signaux provenant du VNA vers la ligne. Les pointes sont séparées par une distance nommée « pitch » qui peut varier généralement de 100 μm à 1300 μm selon les dimensions de la ligne à mesurer. Deux sondes de mesure sont nécessaires pour obtenir les 4 paramètres S en transmission et réflexion d'une ligne coplanaire : il s'agit d'une mesure dites 2 ports.

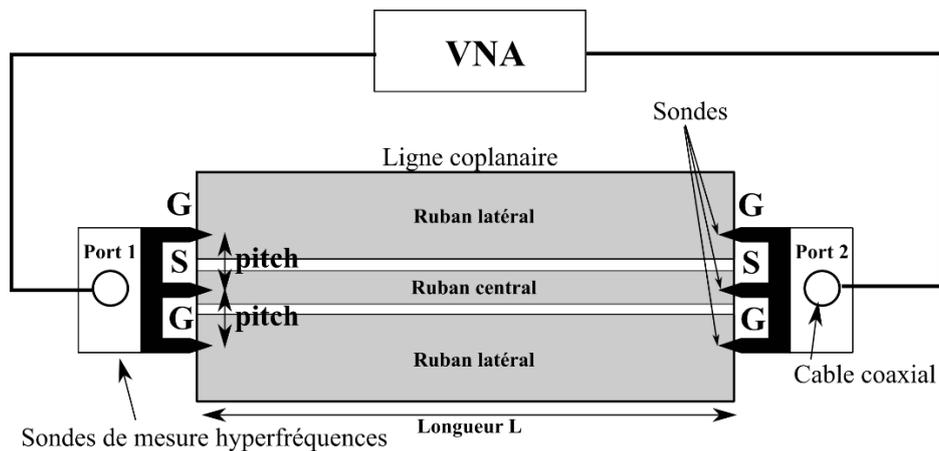


Figure III-4 : Schéma de principe des mesures des CPW avec les pointes RF

En Figure III-5 le montage réalisé pour les mesures est présenté. Un VNA Anritsu ME7808B, une station de mesure manuelle Suss Microtech PSM6RF et des sondes de mesure GSG ACP 40 GHz avec un pitch de 1250 μm sont utilisées. Le logiciel Wincal permet de piloter et gérer le calibrage du système de mesure (VNA, connectique et sondes), ainsi que de récupérer les paramètres S établis par le VNA. Une loupe binoculaire, qui grossit 50 à 120 fois la taille des dispositifs, est également nécessaire afin de positionner précisément les pointes et de réaliser leur pose sans les endommager.

Pour des dispositifs imprimés la pose de la sonde peut s'avérer complexe en raison de la rugosité des pistes. En effet, les pointes de la sonde étant planes, une différence de planéité à la pose peut les endommager. Le problème principal peut venir du fait que la pointe centrale est posée sur le ruban central et que son épaisseur peut être plus importante que celle sur les rubans de masse où sont posées les deux autres pointes. Ainsi, si les deux pointes latérales ne touchent pas les rubans de masse, la mesure ne peut pas s'effectuer.

Dans cette étude, la technique de pose des pointes a donc été adaptée. Les pointes sont posées sur le substrat devant la ligne coplanaire puis avancées sur le bord de la ligne pour obtenir le contact. Cette technique de pose ne peut se faire qu'avec des pointes souples sinon elles risquent d'être endommagées.

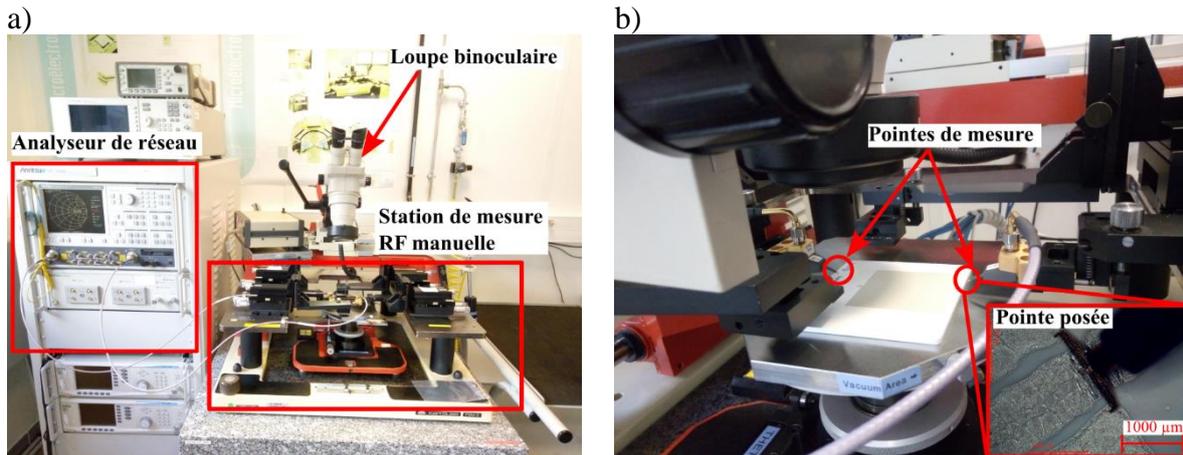


Figure III-5 : a) Photographie du montage de mesures RF b) Photographie de la zone de mesure

Un calibrage est réalisé sur le VNA, cela permet de corriger les erreurs systématiques du VNA et de définir le plan de référence de la mesure au bout des sondes. Le VNA est calibré en LRM (Line-reflect match), ce calibrage permet de s'affranchir des valeurs étalons fournies par le constructeur qui sont à la limite des spécifications avec un pitch large de 1250 μm. De plus, elle permet un calibrage sur une large bande de fréquence.

Ainsi, avec ce matériel, il est possible de mesurer des dispositifs imprimés hors gabarits, en particulier en termes de taille, par rapport aux dispositifs RF plus couramment utilisés.

III.2.1.1. Propriétés électromagnétiques des substrats

Le substrat est partie intégrante de la ligne de transmission coplanaire, ainsi il est important de mesurer ses propriétés électromagnétiques pour pouvoir modéliser la ligne puis la réaliser en correspondance avec les spécifications. Dans cette partie, la méthode de caractérisation des substrats est développée puis les mesures réalisées sont présentées.

III.2.1.1.a) Méthode de caractérisation

La caractérisation du substrat consiste à déterminer ϵ_r et $\tan\delta$, la permittivité relative réelle et la tangente de pertes du matériau liée à un courant de conduction et de déplacement (relaxation dipolaire) [150]. La connaissance de ϵ_r et $\tan\delta$ est indispensable pour la modélisation prédictive de dispositifs radiofréquences.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour la caractérisation électromagnétique des substrats [151] :

- Méthode en sondes coaxiales
- Méthode en lignes de transmission
- Méthode en cavités résonantes
- Méthode en espace libre
- Méthode en résonateur diélectrique

La méthode en cavités résonantes, aussi appelée méthode de faibles perturbations, est utilisée car sa mise en œuvre est aisée dans le cas de l'utilisation de substrat plastique que l'on

peut facilement découper en échantillon. En complément de cette mesure, la méthode en ligne de transmission sera également utilisée. L'utilisation des cavités fait suite au travail de Guers [151] ; les cavités réalisées dans le cadre de sa thèse seront utilisées. Cette méthode permet l'extraction avec précision des grandeurs ϵ_r et $\tan\delta$ pour une valeur de fréquence unique, cette méthode est donc monofréquence.

Une cavité résonante (Figure III-6) est un ensemble aux parois réfléchissantes délimitant un volume dans lequel des oscillations électromagnétiques peuvent être générées [152,153]. Cette cavité a la capacité d'entrer en résonance à des valeurs de fréquences particulières. Pour cette étude, la cavité est un cylindre creux dont la hauteur et le diamètre sont calculés pour résonner à une fréquence donnée. L'échantillon de substrat est inséré dans le bouchon supérieur, les connecteurs sont reliés au VNA (Vector Network Analyser).

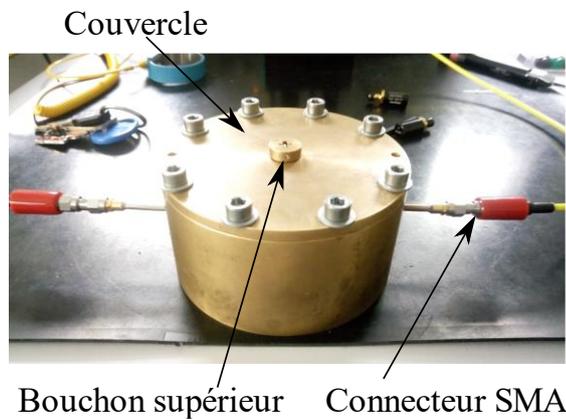


Figure III-6 : Photographie de la cavité résonante en laiton à 2,45 GHz

La méthode de faibles perturbations consiste à mesurer les paramètres S de la cavité à vide, et avec l'échantillon afin d'en déduire la perturbation du champ électromagnétique induite par l'introduction de l'échantillon. En effet, lorsque l'échantillon est placé dans la cavité, un décalage du pic de résonance et une modification du facteur de qualité sont observés comme montré en Figure III-7 : le pic est plus bas et plus large pour une cavité contenant l'échantillon. Ce décalage permet d'en déduire les parties réelles et imaginaire de la permittivité complexe de l'échantillon avec les formules suivantes :

$$\epsilon_r' = \alpha_1 \cdot \frac{V_c}{V_{sub}} \cdot \frac{f_c - f_{sub}}{f_c} + 1 \quad (III.14)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{\alpha_1}{2} \cdot \frac{V_c}{V_{sub}} \cdot \left(\frac{1}{Q_c} - \frac{1}{Q_{sub}} \right) \quad (III.15)$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (III.16)$$

Avec

- $\alpha_l=0,53903$ est un coefficient issu de la théorie [143,154] (-)
- V_c le volume de la cavité à vide (m^3)
- V_{sub} le volume de l'échantillon de substrat (m^3)
- f_c la fréquence de résonance de la cavité (Hz)
- f_{sub} la fréquence de résonance de la cavité avec l'échantillon (Hz)
- Q_c le coefficient de qualité de la cavité (-)
- Q_{sub} le coefficient de qualité de la cavité avec l'échantillon (-)

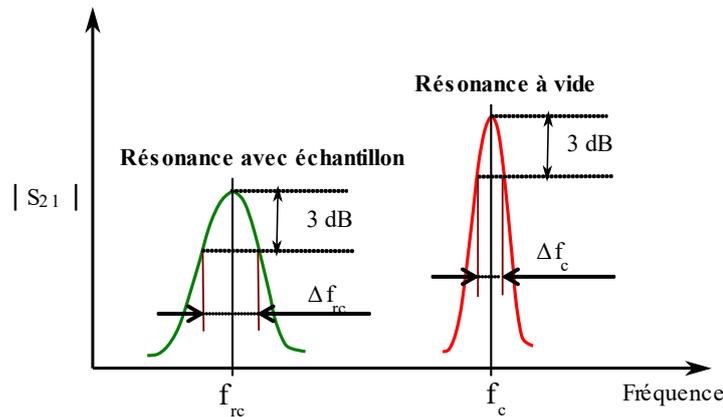


Figure III-7 : $|S_{21}|$ de la cavité à vide et avec l'échantillon

Le coefficient de qualité et la bande passante fractionnelle (BW) à -3 dB sont calculés par les équations suivantes :

$$Q = \frac{f \cdot BW}{\Delta f} \quad (III.17)$$

$$BW_{-3dB} = \left(10^{\frac{\alpha}{10}} - 1\right)^{\frac{1}{2}} \quad (III.18)$$

Avec

- Q le coefficient de qualité (-)
- f la fréquence de résonance (Hz)
- Δf largeur de bande de fréquence (Hz)
- BW la bande passante fractionnelle à -3 dB (-)
- α l'atténuation par rapport au maximum en dB, ici $\alpha=3$ dB

Grâce aux équations (III.14) et (III.15) il est possible de déterminer la permittivité relative réelle ϵ_r et la tangente de perte $\tan\delta$ du substrat. Cette méthode est limitée en termes de bande de fréquence par la taille minimale des cavités par exemple la cavité réalisée pour 6 GHz fait 4 cm de diamètre. Il sera difficile de mesurer les paramètres des substrats pour une fréquence plus élevée.

III.2.1.1.b) Résultats de caractérisation des substrats

Pour le substrat PC+ABS (paragraphe II.2), des tranches ont été réalisées pour obtenir des échantillons en « languette » et pouvoir les insérer dans le bouchon supérieur de la cavité.

La mesure est réalisée avec un VNA Anritsu calibré en SOLT (Short, Open, Load, Thru) et les cavités 0,9 et 2,45 GHz en laiton. La mesure du volume d'un échantillon est réalisée avec un palmer et une règle. Les résultats, pour le substrat PC+ABS sur 10 échantillons, sont présentés dans le Tableau 42. La permittivité décroît légèrement quand la fréquence augmente et la tangente de perte est stable en considérant les incertitudes, c'est un comportement attendu.

Tableau 42 : Caractéristiques du substrat PC+ABS pour 0,9 et 2,45 GHz

Fréquence de la cavité	0,9 GHz	2,45 GHz
Permittivité relative ϵ_r	3,49±0,16	3,42±0,07
Tangente de perte $\tan\delta$	0,012±0,001	0,011±0,004

Les autres substrats présentés dans cette thèse sont mesurés avec la même méthode.

III.2.2. Méthode d'extraction des paramètres RLGC

La mesure des lignes de transmission coplanaires est réalisée avec le VNA et donne les paramètres S. Cependant, dans le but d'être précis sur la mesure il est nécessaire d'utiliser une méthode d'épluchage (*deembedding* en anglais) pour retirer l'effet de l'accès à la ligne et l'effet des sondes de mesure. Etant donné la configuration planaire et les spécificités des dispositifs étudiés, deux méthodes ont été appliquées afin de pouvoir comparer les résultats obtenus : la méthode de Mangan [155] et la méthode de Lacrevez et Houzet, appelée méthode LH [156] dont les principes ont été utilisés. L'objectif principal de ces méthodes est d'obtenir les paramètres primaires (RLGC) et secondaires (γ et Z_c) de la ligne

III.2.2.1. Méthode de Mangan

Cette méthode d'extraction consiste à considérer deux dispositifs intégrant respectivement deux lignes coplanaires de longueurs différentes dont la section est strictement identique (Figure III-8). En considérant que pour les deux lignes la contribution des pointes sur la mesure des paramètres S est identique, il est possible de retirer l'effet de l'accès à la ligne et l'effet des sondes de mesure.

La particularité de la méthode de Mangan est d'utiliser une admittance afin de modéliser les accès de la ligne comme montré en Figure III-8. Le détail des calculs est donné dans l'Annexe E. Cette méthode peut être utilisée quelle que soit la longueur de la ligne, ce qui est plus facile à mettre en œuvre pour un procédé d'impression comportant des contraintes géométriques.

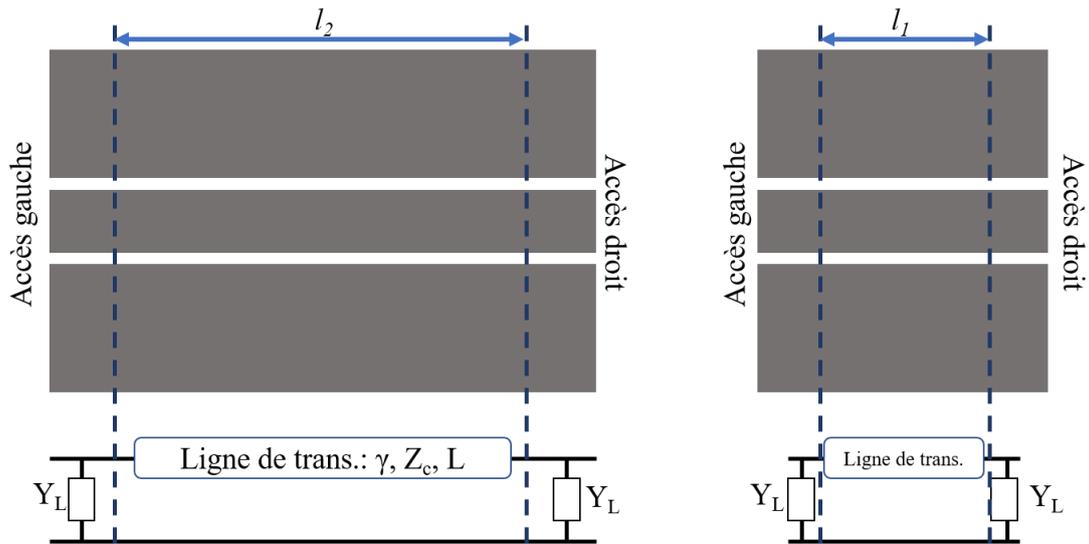


Figure III-8 : Schéma des lignes de transmission coplanaires de longueur 1 et 2

III.2.2.2. Méthode LH

La méthode LH [156] propose une modélisation différente de Mangan : la modélisation des ports est réalisée avec 2 impédances. Cela rend la méthode plus précise [157], cependant pour cela les lignes doivent être de longueur plus réduite (longueur de l'accès dont l'effet est à retirer << longueur d'onde) ce qui rend sa mise en œuvre plus difficile avec le procédé d'impression.

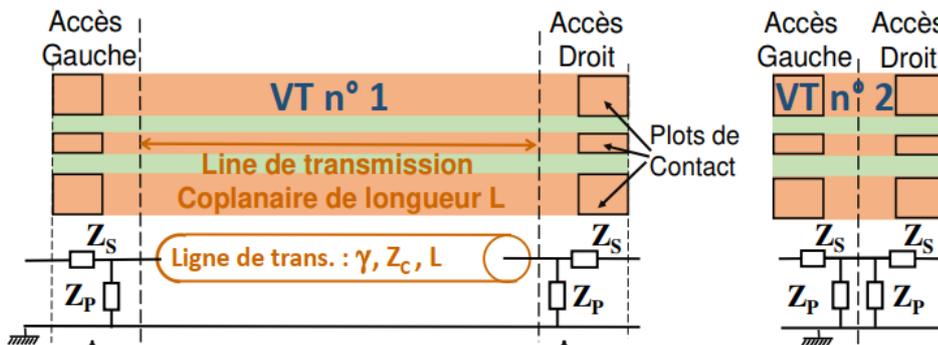


Figure III-9 : Schéma des véhicules de test (VT) et schéma électrique équivalent [156]

Les deux méthodes présentées diffèrent par leur modélisation des accès : la méthode Mangan décrit les accès par une admittance et la méthode LH par deux impédances. Cette dernière prend alors en plus de l'effet capacitif et conductif de l'accès, un effet résistif et inductif, ce qui la rend plus précise.

III.3. Conception et caractérisation radiofréquence de lignes de transmission coplanaires imprimées en 2D

L'objectif de cette partie est de réaliser des lignes coplanaires pour évaluer les performances radiofréquences de l'impression d'encre conductrice sur un substrat isolant plastique.

Dans un premier temps, les contraintes de réalisation des lignes de transmission lié au procédé seront explicitées. Les simulations sont réalisées afin de pouvoir déterminer la structure adéquate. Dans un deuxième temps, les dispositifs sont imprimés puis mesuré géométriquement. Les mesures radiofréquence sont ensuite effectuées, puis une extraction des paramètres est réalisée afin de quantifier les performances RF. Ces performances seront également comparées à des lignes de transmission coplanaires en cuivre, classiquement utilisée.

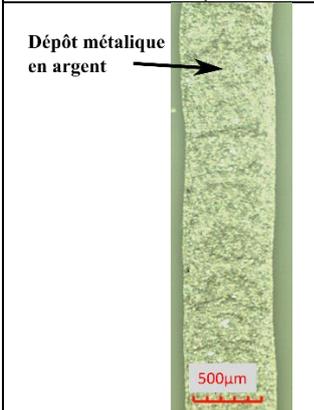
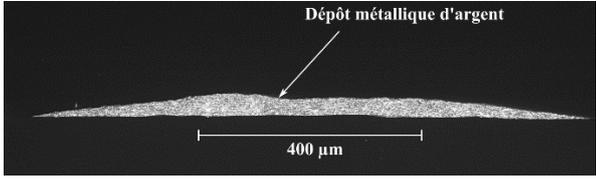
III.3.1. Conception des lignes de transmission coplanaires

III.3.1.1. Contraintes de réalisation et spécifications des lignes de transmission coplanaires

Pour atteindre l'objectif visé de cette partie, les lignes à imprimer doivent être réalisées en connaissant les contraintes liées au procédé d'impression et à la mesure, et elles doivent respecter les spécifications visées.

Tout d'abord, les lignes de transmission coplanaires doivent être imprimables par le procédé d'impression présenté dans le chapitre précédent. Dans le Tableau 43, sont données les principales contraintes liées au procédé d'impression.

Tableau 43 : Contraintes du procédé d'impression pour réaliser les lignes de transmission coplanaires

<i>Largeur de ligne minimale (μm)</i>	<i>Epaisseur de ligne moyenne (μm)</i>	<i>Ecart minimal entre deux lignes (μm)</i>
		
689±27	25±2	133±23

En plus, des contraintes liées au procédé d'impression, des contraintes de mesure existent par l'utilisation de sondes de mesures radiofréquence dont le pitch est de 1250 μm (détaillé dans la partie III.2.1). La contrainte peut s'écrire :

$$\frac{W}{2} + G < 1250 \mu\text{m} \quad (\text{III.19})$$

Avec W la largeur du ruban central et G l'espace entre le ruban central et les rubans latéraux (Figure III-1).

Les contraintes liées au procédé et à la mesure doivent être respectées afin de pouvoir réaliser et mesurer les lignes de transmission coplanaire. Celles-ci doivent également répondre à des spécifications : ces lignes doivent être adaptées à 50 Ω sur la gamme de fréquence 0,5 à 8 GHz. Dans cette bande de fréquence de nombreuses applications sont possibles telles que la fréquence Wifi (2,45 & 5 GHz), 5G (3,4-3,8 GHz), internet des objets (0,7, 0,8, 0,9, 1,8 et 2,6 Hz) ou communication avec engins spatiaux (7,190-7,250 GHz).

III.3.1.2. *Conception par modélisation de lignes coplanaires de transmission*

Afin de réaliser des lignes de transmission coplanaires, il faut tout d'abord réaliser un travail de conception qui consiste à déterminer la géométrie et les dimensions répondant aux spécifications (paragraphe III.3.1.1). Pour cela, des études en modélisation et simulation électromagnétiques sont nécessaires. Trois outils de simulation sont utilisés : CST Microwave studio, ADS (Advanced Design System) et Maxwell 2D.

III.3.1.2.a) Modélisation sur le module LineCalc du logiciel ADS

Le module LineCalc du logiciel ADS est utilisé dans un premier temps car cet outil permet de déterminer rapidement les dimensions G et W d'une ligne de transmission coplanaire à partir des caractéristiques des matériaux. En Figure III-10, l'interface de la simulation est présentée. Les paramètres de la ligne coplanaire, ainsi que la fréquence et l'impédance ciblées sont entrées et le logiciel calcule les dimensions de la ligne.

LineCalc est basé sur un modèle analytique de la ligne. Cette méthode est adaptée pour modéliser le comportement électromagnétique d'objet homogène [158] et ne prend en compte que le mode TEM uniquement. Elle est rapide mais ne prend pas en compte les modes d'ordre supérieur et la largeur des plans de masse.

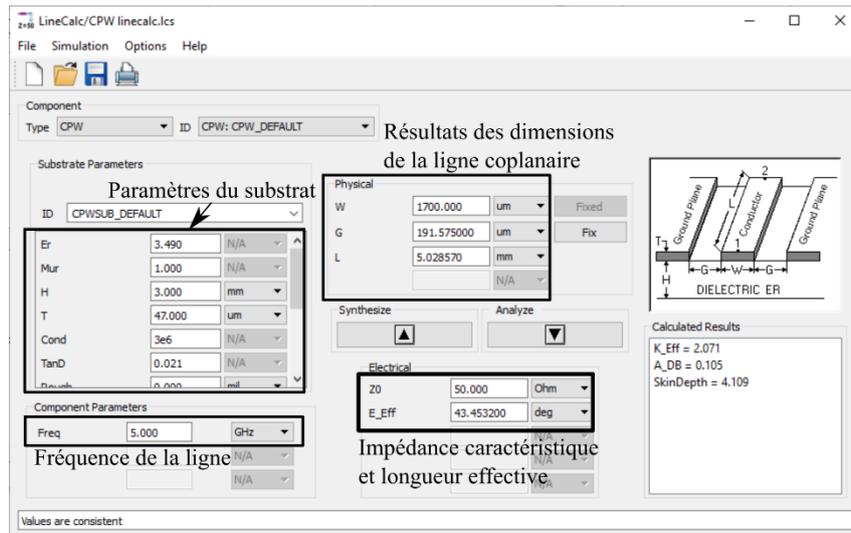


Figure III-10 : Interface du module Linecalc pour simulation 2D des lignes coplanaires

Dans cette simulation, les paramètres d'entrée sont les suivants :

- ϵ_r et $\tan\delta$ déterminés avec la méthode des cavités (0)
- H l'épaisseur du substrat de 3 mm
- T , l'épaisseur déterminée des mesures effectuées sur une ligne de largeur W
- σ , la conductivité de l'encre recuite qui a été mesurée (Figure II-43)
- f , la fréquence qui correspond au milieu de la bande de fréquence visée car la ligne coplanaire est large bande
- Z_0 l'impédance caractéristique de la ligne : dans le meilleur des cas il faudrait que cette valeur soit de 50Ω pour être adaptée avec les composants connectés et donc éviter les réflexions. En revanche, il y a souvent du filtrage avant ou après la ligne car elles sont rarement parfaitement adaptées.

Les valeurs de ces paramètres d'entrée sont reportées dans le Tableau 44.

Tableau 44 : Valeur des paramètres d'entrée de la simulation ADS

ϵ_r	$\tan\delta$	H (mm)	T (mm)	f (GHz)	σ (S/m)
3,49	0,021	3	0,047	5	3×10^6

Les grandeurs de sortie de la modélisation électromagnétique sont : $W=1700 \mu\text{m}$ et $G=192 \mu\text{m}$ avec une longueur L proposée de 5 mm.

ADS permet une simulation en 2D rapide de la ligne coplanaire mais ne prend pas en compte les modes d'ordres supérieurs qui seraient susceptibles de se propager et ne fournit pas la largeur de plan de masse. Ainsi, pour vérifier les caractéristiques de la ligne, un modèle 3D est réalisé sur CST.

III.3.1.2.a) Modélisation sur Maxwell 2D

Maxwell 2D est un logiciel de modélisation électromagnétique 2D. Il suppose que la section de la ligne de transmission à modéliser est homogène dans le sens de propagation, aussi bien en dimension qu'en propriétés électriques des matériaux qui la composent. Il suppose également un comportement du dispositif quasi-statique ce qui simplifie la résolution des équations de Maxwell. De plus, il considère la propagation en mode TEM.

Afin de réaliser la modélisation de la ligne de transmission coplanaire dans Maxwell 2D, la structure est dessinée dans le logiciel (Figure III-11) puis pour chaque composant de cette structure, les propriétés électriques du matériau sont décrites. Les grandeurs de sortie de cette modélisation sont les paramètres linéiques RLGC. Ces résultats seront présentés avec les mesures des lignes.

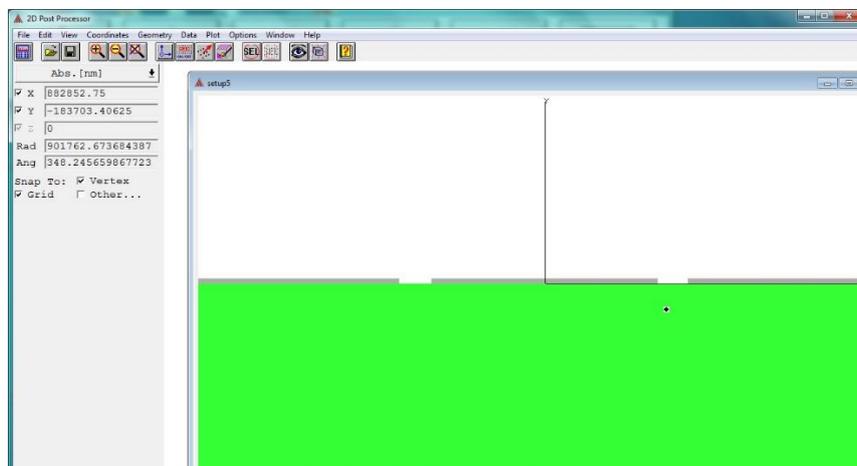


Figure III-11 : Structure de la ligne de transmission coplanaire sur Maxwell 2D

III.3.1.2.b) Modélisation 3D à l'aide du logiciel CST microwave studio

Dans le domaine fréquentiel CST microwave studio est basé sur la méthode des éléments finis et dans le domaine temporel sur la méthode « frequency domain time domain ». Il est possible de faire cette simulation sur des objets 3D. La discrétisation de la géométrie est réalisée par un maillage hexagonal ou tétraédral. Cette simulation tient compte des modes d'ordres supérieurs cependant, le temps de simulation est plus important que sur ADS (plusieurs minutes à plusieurs heures). Afin de réaliser une modélisation dans CST, il est nécessaire de dessiner la structure en 3D et de renseigner les propriétés électromagnétiques de chaque matériau utilisé. Les grandeurs de sortie obtenues sont les paramètres S et d'autres grandeurs qui ne seront pas utilisées par la suite.

La ligne coplanaire est dessinée sur CST avec les mêmes paramètres que dans le Tableau 44 avec $W=1700\ \mu\text{m}$ et $G=192\ \mu\text{m}$ d'après le résultat de la simulation sur ADS. La largeur de plans W_g est de 6 mm.

La structure simulée dans CST est présentée en Figure III-12a). Les dépôts métalliques et le substrat sont des parallélépipèdes afin de faciliter le dessin de la structure. Une

approximation est faite ici car en réalité les dépôts métalliques présentent des sections arrondies plutôt que rectangulaires comme montré en Figure III-12b). Des essais ont été menés en simulation et ont montré que l'impact de cet arrondi est mineur sur les paramètres S : la moyenne des erreurs sur le paramètre S_{11} est de 4% et sur le paramètre S_{21} de 12%.

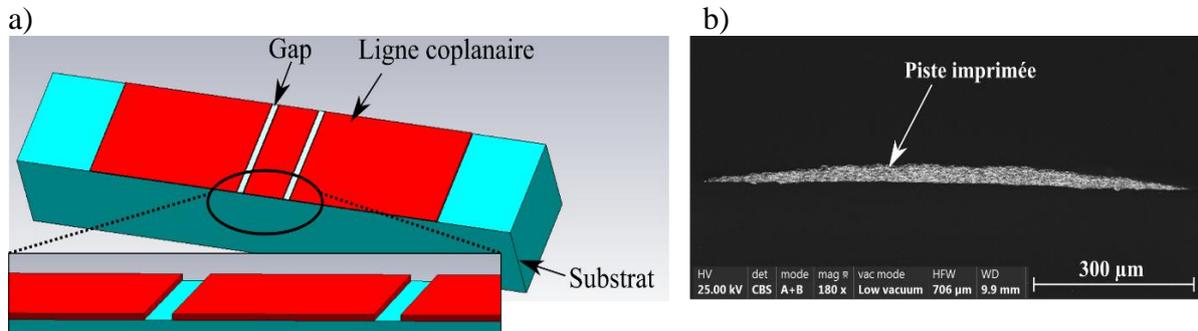


Figure III-12 : a) Structure de la ligne de transmission coplanaire simulée b) Coupe en cliché MEB du ruban central de la ligne de transmission coplanaire

La structure présentée en Figure III-12 est simulée pour deux lignes de longueur 5 et 4 mm. Les paramètres mesurés du substrat sont utilisés : $\epsilon_r=3,42$ et $\tan\delta=0,011$. La conductivité mesurée de 3×10^6 S/m est utilisée pour l'encre.

Les paramètres S de ces lignes de transmission coplanaire sont présentés en Figure III-13. Ces lignes ont été dessinées pour obtenir une impédance de 50Ω , de plus l'impédance de référence est de 50Ω , ainsi le module du paramètre S_{11} étant inférieur à -14 dB jusqu'à 8 GHz cela montre une adaptation proche de 50Ω .

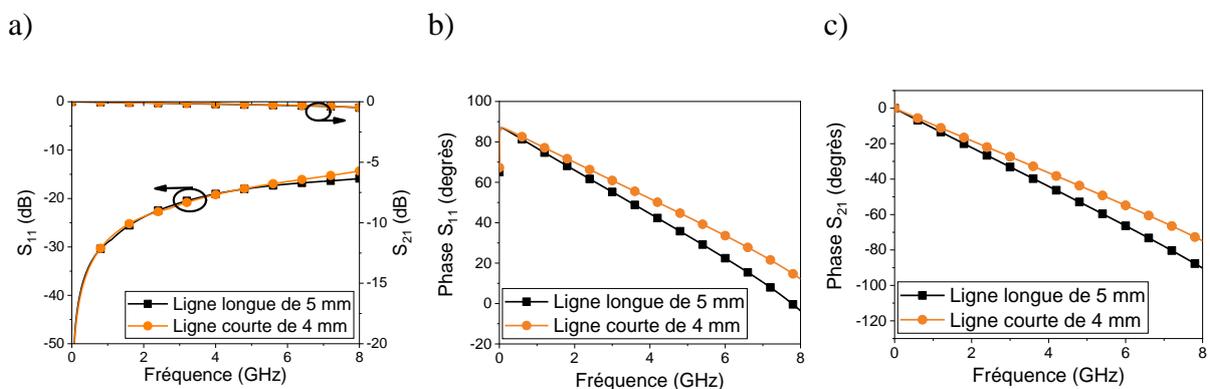


Figure III-13 : Influence de la longueur de la ligne de transmission coplanaire sur a) Le module des paramètres S_{11} et S_{21} simulés b) Sur la phase du paramètre S_{11} simulé c) Sur la phase du paramètre S_{21} simulé

III.3.1.3. Matériels et Méthodes pour l'impression

La structure de la ligne de transmission coplanaire ayant été modélisée, les résultats seront confrontés à la mesure sur les lignes imprimées. Dans ce paragraphe, la méthode d'impression pour réaliser ce dispositif modélisé est présentée.

L'impression est réalisée sur le robot 6 axes Stäubli avec le système d'impression Vermes. L'encre Electrodag 418SS de Henkel et le substrat PC+ABS sont utilisés. Ces différents matériels ont été détaillés dans le chapitre II.

La ligne de transmission coplanaire est constituée de trois éléments métalliques : deux rubans latéraux de masse et un ruban central de largeur W , séparés par un espacement G . La stratégie d'impression présentée en Figure II-51 est utilisée. Dans cette stratégie, les formes rectangulaires sont imprimées avec un contour afin d'obtenir des côtés plus rectilignes cependant, ici les rubans centraux étant peu larges, les contours sont appliqués uniquement pour les rubans de masse. Les valeurs pour le système d'impression sont celles répertoriées dans le Tableau 27.

Le programme d'impression se décompose en 4 sous programmes principaux qui seront détaillés par la suite :

- *start* : permet d'entrer toutes les variables utilisées dans le programme et d'appeler les sous-programmes dans l'ordre voulu.
- *calcul_pulses* : ce sous-programme permet de calculer le nombre de gouttes à éjecter lors d'une connexion avec la tête d'impression en RS232
- *trajectoire_pm_1* et *trajectoire_pm_2* : décrivent respectivement la trajectoire du premier et du deuxième ruban latéral de masse
- *trajectoire_ligne* : la trajectoire du ruban central est décrite

Plusieurs types de variables sont utilisés pour l'impression de lignes coplanaires en 2D :

- Points : définis par 6 coordonnées (X, Y, Z, R_x, R_y, R_z) les trois dernières définissant les rotations
- Repère : défini par trois points (P_0, P_x, P_y)
- Vitesse : décrit la vitesse d'impression par exemple
- Outil : définit la taille et le poids de l'outil
- Variables numériques : permettent de définir les caractéristiques des lignes

Le repère est placé dans un coin du substrat afin de pouvoir aisément situer et placer les coordonnées des points de la trajectoire. L'outil est mesuré précisément comme décrit dans la sous-partie 0.

Les variables principales du programme d'impression sont décrites dans le Tableau 45 avec pour paramètres :

- W la largeur du ruban central (mm)
- W_g la largeur des rubans latéraux de masse (mm)
- l la longueur de la ligne coplanaire (mm)
- a est la distance nécessaire au robot pour atteindre une vitesse constante et commencer l'impression comme présenté en Figure II-44 (mm)
- L la largeur d'une ligne d'encre imprimée avec un recouvrement $OL_L=50\%$ (mm)
- G l'espacement théorique calculé dans la simulation radiofréquence (mm)

Tableau 45 : description des variables principales du programme d'impression des CPW 2D

	Description	Calculs
<i>nbre_iter_pm</i>	Nombre de lignes d'encre imprimées nécessaires pour réaliser l'ensemble du ruban de masse	$nbre_iter_pm = \frac{[W_g - L]}{L}$
<i>nbre_iter_ligne</i>	Nombre de lignes d'encre imprimées nécessaires pour réaliser l'ensemble du ruban central	$nbre_iter_ligne = \frac{[W - L]}{L}$
<i>G_robot</i>	Distance entre le ruban central et les rubans de masse en prenant en compte la largeur de la ligne imprimée	$G_robot = G + L$
<i>lline</i>	Longueur de la ligne coplanaire	$lline = l + 2 \cdot a$
<i>inter</i>	Superposition latérale des gouttes d'encre OL _w (Figure II-4)	50%
<i>diam</i>	Diamètre de goutte	-
<i>OLL</i>	Superposition longitudinale des gouttes d'encre OL _L (Figure II-4)	50%

Ainsi il est possible de calculer les paramètres du programme robot à partir des caractéristiques issues de la modélisation des lignes de transmission coplanaires. Dans le Tableau 46 sont calculées les valeurs utilisées pour le programme d'impression des lignes coplanaires V8.

Tableau 46 : Paramètres robot calculés à partir des paramètres théoriques

	<i>nbre_iter_pm</i>	<i>nbre_iter_ligne</i>	<i>G_robot</i>	<i>lline</i>	<i>inter</i>	<i>diam</i>
Valeurs	7	2	760 μm	3 et 4 mm	360 μm	665 μm

Avec ces valeurs, il est possible de réaliser la trajectoire désirée pour imprimer une ligne de transmission coplanaire. Huit points sont définis pour former la trajectoire complète d'un ruban de masse ou du ruban central en translatant ces points. La Figure III-14 montre ces points et comment la translation est effectuée. Le nombre de translations à effectuer est donné par *nbre_iter_pm* pour les rubans de masse et *nbre_iter_ligne* pour le ruban central. Le point P_{1a} est le point d'approche permettant au système d'impression d'atteindre une vitesse constante avant impression au point P_1 .

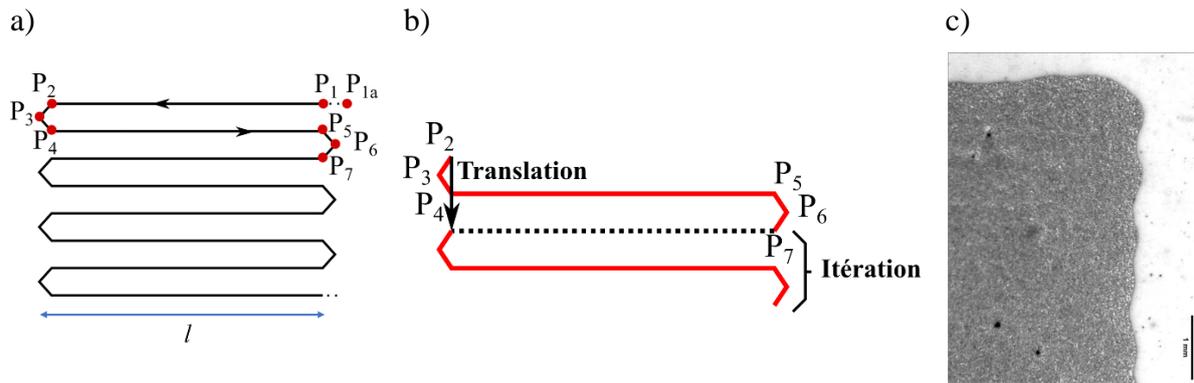


Figure III-14 : a) Points formant la trajectoire du ruban central et des rubans de masse b) Définition des translations et itérations réalisées pour imprimer une ligne de transmission coplanaire c) Exemple d'aplat réalisé avec cette trajectoire

Deux algorithmes résument le processus à réaliser pour imprimer une ligne de transmission coplanaire :

- L'Algorithme 1 « start » effectue une initialisation des variables dans un premier temps afin de définir le repère de la plaque avec les points P_0, P_x et P_y et les variables numériques décrites précédemment. Un premier programme est appelé pour calculer le nombre de gouttes d'encre nécessaires à l'impression du motif. Ensuite, le système d'impression est déplacé à son point de départ puis sont appelés successivement les programmes : d'impression du premier ruban latéral de masse, du ruban central et du deuxième ruban latéral de masse. Dans un objectif d'optimisation du programme, il serait possible de réaliser un seul et même programme pour ces trois éléments. A la fin de l'Algorithme « start », le programme « end » est lu automatiquement. Celui-ci affiche un message à l'écran du boîtier du robot pour signifier que l'impression est terminée.

Algorithme 1 : « start »

Initialisation :		1
	Définition des points P_0, P_x, P_y	2
	Définition du repère	3
	Définition des points $P_{1a}, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ et P_7	4
	Définitions des valeurs variables numériques	5
		6
Traitement :		7
	Appel du programme de calcul du nombre de gouttes	8
	Mouvement en joint au point de départ	9
	Appel du programme d'impression du ruban latéral de masse	10
	Appel du programme d'impression du ruban central	11
	Appel du programme d'impression du ruban latéral de masse	12
	Mouvement en joint au point de départ	13

- L'Algorithme 2 résume le processus qui gère la trajectoire pour l'impression des rubans. La tête d'impression est amenée au point d'approche P_{1a} . Une des spécificités du robot Stäubli est utilisé ici : le multitasking. Une tâche « impression » est créée ce qui signifie que le robot exécutera ce sous-programme

en parallèle du reste du programme. Cette tâche permet de déclencher l'impression pendant un mouvement du robot. L'achèvement de 80% de la trajectoire du segment $[P_{1a} - P_1]$ déclenche l'impression. Cela correspond à la distance a prise en compte dans le calcul de l_{line} . Une première itération est effectuée en dehors de la boucle « Pour » car le point P_1 n'est nécessaire qu'à cette itération (Figure III-14). Dans la boucle les coordonnées des points sont décalées de la distance $inter$ à chaque itération afin d'imprimer les rubans. Dans la boucle « Pour », une condition est établie pour la dernière itération afin de terminer l'aplat sur une ligne droite sans les points P_6 et P_7 (Figure III-14).

Algorithme 2 : impression d'un aplat (ruban central ou ruban latéral de masse)

Initialisation :	1
j=1	2
	3
Traitement :	4
Mouvement au point P_{1a}	5
Création d'une tâche « impression »	6
Identification numérique du prochain mouvement comme 1000	7
Mouvement aux points $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ et P_7	8
	9
Pour j=2 à $nbre_iter$	10
Si j= $nbre_iter$	11
Translation des points P_2, P_3, P_4, P_5	12
Mouvement aux points P_2, P_3, P_4, P_5	13
Sinon	14
Translation des points P_2, P_3, P_4, P_5, P_6 et P_7	15
Mouvement aux points P_2, P_3, P_4, P_5, P_6 et P_7	16
	17
Fin Si	18
Fin Pour	19

L'algorithme 2 est effectué 3 fois : une fois pour le premier ruban latéral de masse, une fois pour le ruban central et une fois pour le deuxième ruban latéral. Pour l'impression du ruban central et du deuxième ruban latéral, un décalage (*G-robot*) est ajouté pour respecter l'espacement entre les rubans.

Le comptage du nombre de gouttes est une difficulté importante car malgré le calcul réalisé, ce nombre ne correspond pas toujours au nombre de goutte réellement nécessaire car il y a des variations de vitesse du robot lors de passage de coins par exemple. Une amélioration de la configuration est réalisée en ajoutant une connexion PLC (Figure II-16) afin de pouvoir arrêter l'impression à un point de la trajectoire donné, plus facilement.

III.3.2. Caractérisation des lignes de transmission coplanaires imprimées

III.3.2.1. Caractérisation morphologique

Toutes les dimensions associées à la morphologie des lignes coplanaires imprimées avec un recouvrement latéral et longitudinal de 50%, sont mesurées avec une loupe binoculaire et l'interféromètre optique. Les deux gaps G_{mg} et G_{md} et la largeur du ruban central W_m sont mesurés, comme montré sur la Figure III-15. La longueur l de la ligne est vérifiée au réglet.

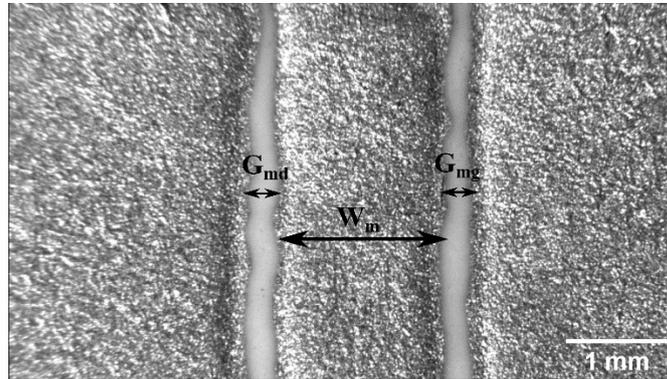


Figure III-15 : Ligne coplanaire V8 imprimé

Le Tableau 47 récapitule les dimensions mesurées des lignes coplanaires imprimées. V8.1, V8.2, V8.3 et V8.4 sont les références des 4 plaques sur lesquelles 4 CPW sont imprimées. Ainsi les moyennes présentées sont réalisées sur 10 mesures par CPW, soit 40 mesures au total.

Tableau 47 : Dimensions des lignes de transmission coplanaire

	G_{mg} gauche (μm)	W_m (μm)	G_{md} droit (μm)	Longueur l (mm)
V8.1	241±27	1621±39	228±22	5
V8.2	233±35	1658±45	196±60	5
V8.3	207±35	1674±30	226±72	4
V8.4	244±32	1627±36	225±30	4
Moyenne	231±17	1645±25	219±15	-

Une épaisseur de $42\pm 7 \mu\text{m}$ en moyenne est mesurée sur 8 mesures. Cette valeur est proche de la valeur théorique établie en modélisation électromagnétique à l'aide des logiciels présentées dans le paragraphe III.3.1, de $47 \mu\text{m}$.

Pour comparer aux valeurs théoriques visées pour G et W ($G=192 \mu\text{m}$ et $W=1700 \mu\text{m}$), les moyennes de G_{mg} , G_{md} et W_m sont utilisées. Un écart de $+55 \mu\text{m}$ est observé sur W_m par rapport à la valeur théorique, de $+27 \mu\text{m}$ sur G_{md} et de $+36 \mu\text{m}$ sur G_{mg} .

Pour réduire la valeur de W_m il est possible de réduire le recouvrement latéral (les lignes de gouttes sont plus éloignées) afin d'augmenter la largeur du ruban. Pour réduire la valeur de G_{md} et de G_{mg} il faudrait réduire G_{robot} de la valeur de la divergence observée.

III.3.2.2. Caractérisation radiofréquence

III.3.2.2.a) Mesure des paramètres S

Les paramètres S sont mesurés pour 6 lignes coplanaires jusqu'à 8 GHz : 4 longues et 4 courtes. Sur les Figure III-16 et Figure III-17 les paramètres S de ces lignes sont présentés respectivement pour les lignes longue et courtes.

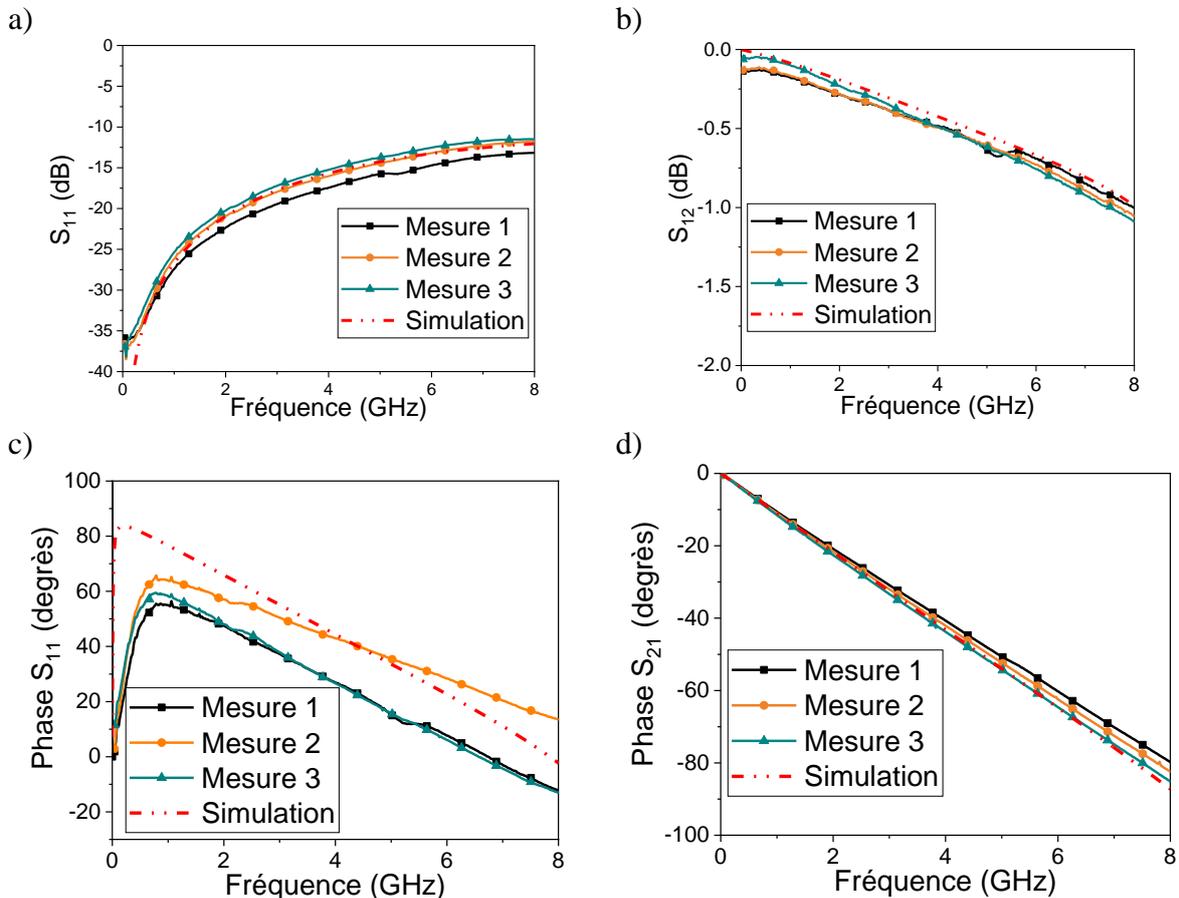


Figure III-16 : Evolution, en fonction de la fréquence, des paramètres pour les lignes de transmission coplanaires longues (5 mm) a) Module du paramètre S_{11} b) Module du paramètre S_{21} c) Phase du paramètre S_{11} d) Phase du paramètre S_{21}

A partir des dimensions mesurées des lignes de transmission coplanaires récapitulées dans le Tableau 47, une rétrosimulation sur le logiciel CST microwave studio a été effectuée. Les dimensions utilisées sont les moyennes des dimensions des lignes mesurées (dernière ligne du Tableau 47). Les caractéristiques des substrats déterminées dans le paragraphe III.3.2.2.b) sont utilisées pour la simulation. On peut observer qu'il y a un bon accord entre mesures et modélisation électromagnétique. Cela montre que la modélisation électromagnétique réalisée correspond aux lignes de transmission coplanaires imprimées. Ce modèle peut donc être utilisé pour des études prédictives par la suite.

Ces lignes de transmission coplanaires ont été réalisées pour obtenir une impédance de 50Ω , de plus l'impédance de référence est de 50Ω , ainsi le module du paramètre S_{11} étant inférieur à -10 dB jusqu'à 8 GHz cela montre une adaptation proche de 50Ω .

La phase du paramètre S_{21} et du paramètre S_{11} montrent des comportements, attendus pour des lignes de transmission coplanaires. La droite obtenue pour la phase du paramètre S_{21} montre que l'accès a un faible impact sur la mesure et que l'adaptation de la ligne est proche de 50Ω .

La dispersion des modules et phases des paramètres S peut s'expliquer par la disparité des dimensions de G_{mg} , G_{md} et W_m selon les lignes comme le montre l'erreur sur les mesures du Tableau 47.

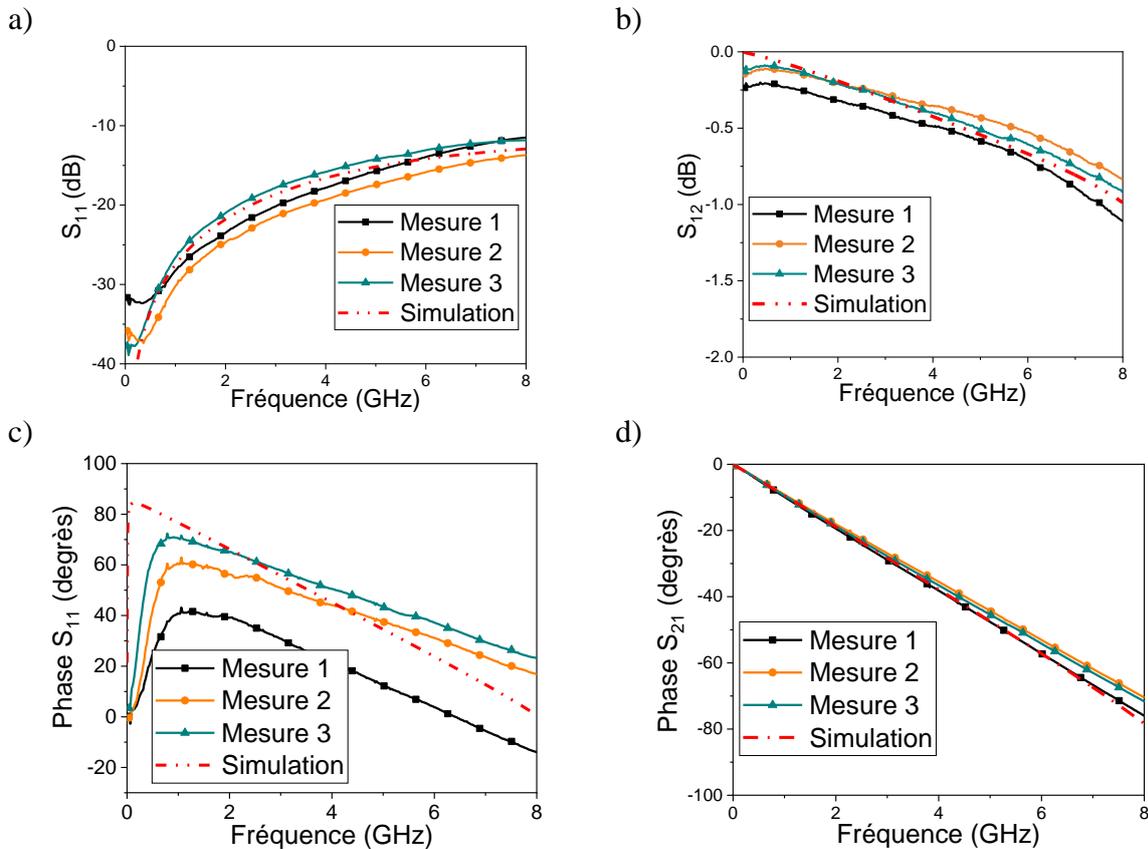


Figure III-17 : Evolution, en fonction de la fréquence, des paramètres pour les lignes de transmission coplanaires courtes (4 mm) a) Module du paramètre S_{11} b) Module du paramètre S_{21} c) Phase du paramètre S_{11} d) Phase du paramètre S_{21}

III.3.2.2.b) Extraction de la permittivité et de la tangente de perte du substrat

A partir des mesures présentées en Figure III-16 et Figure III-17, une extraction de la permittivité du substrat et de la tangente de perte est possible en fonction de la fréquence. Cela permet alors d'évaluer les pertes dans le diélectrique et dans le conducteur en fonction de la fréquence et ainsi d'ajuster avec précision les propriétés électriques introduites dans les différents logiciels de modélisation électromagnétique. Ces mesures ont été utilisées pour la simulation présentée sur les Figure III-16 et Figure III-17.

Les résultats sont extraits par la méthode expliquée dans l'article [156] et sont représentés graphiquement sur la Figure III-18. La permittivité diminue quand la fréquence augmente : de 3,49 à 900 MHz à 1,7 à 8 GHz (Figure III-18.a). La diminution de la permittivité lorsque la fréquence augmente peut-être causée par un phénomène de relaxation dipolaire car, dans le même temps, une augmentation des pertes relatives (ϵ_r'') est également observée. La relaxation dipolaire a lieu lorsque les dipôles ne peuvent plus s'aligner à la vitesse du champ électrique propagé [152] ce qui induit alors des pertes dans le matériau.

On remarque sur la Figure III-18b) que les pertes sont élevées à basse fréquence puis diminuent jusqu'à 2,5 GHz. Ceci est attribué à des phénomènes de pertes par conduction qui

s'atténuent ensuite fortement avec la fréquence. Les pertes qui augmentent à nouveau à partir de 2,5 GHz sont probablement d'origine diélectrique notamment par le phénomène de relaxation dipolaire.

Les résultats concordent avec ceux obtenus par les cavités à des fréquences ponctuelles (à 2,45 GHz : $\epsilon_r=3,42\pm 0,07$, $\tan\delta=0,011\pm 0,004$) : pour la permittivité une différence mineure est observée de 6,7% à 0,9 GHz et de 7,2% à 2,45 GHz par rapport à la valeur mesurée par la méthode de l'article [156], pour la tangente de perte le même résultat est retrouvé.

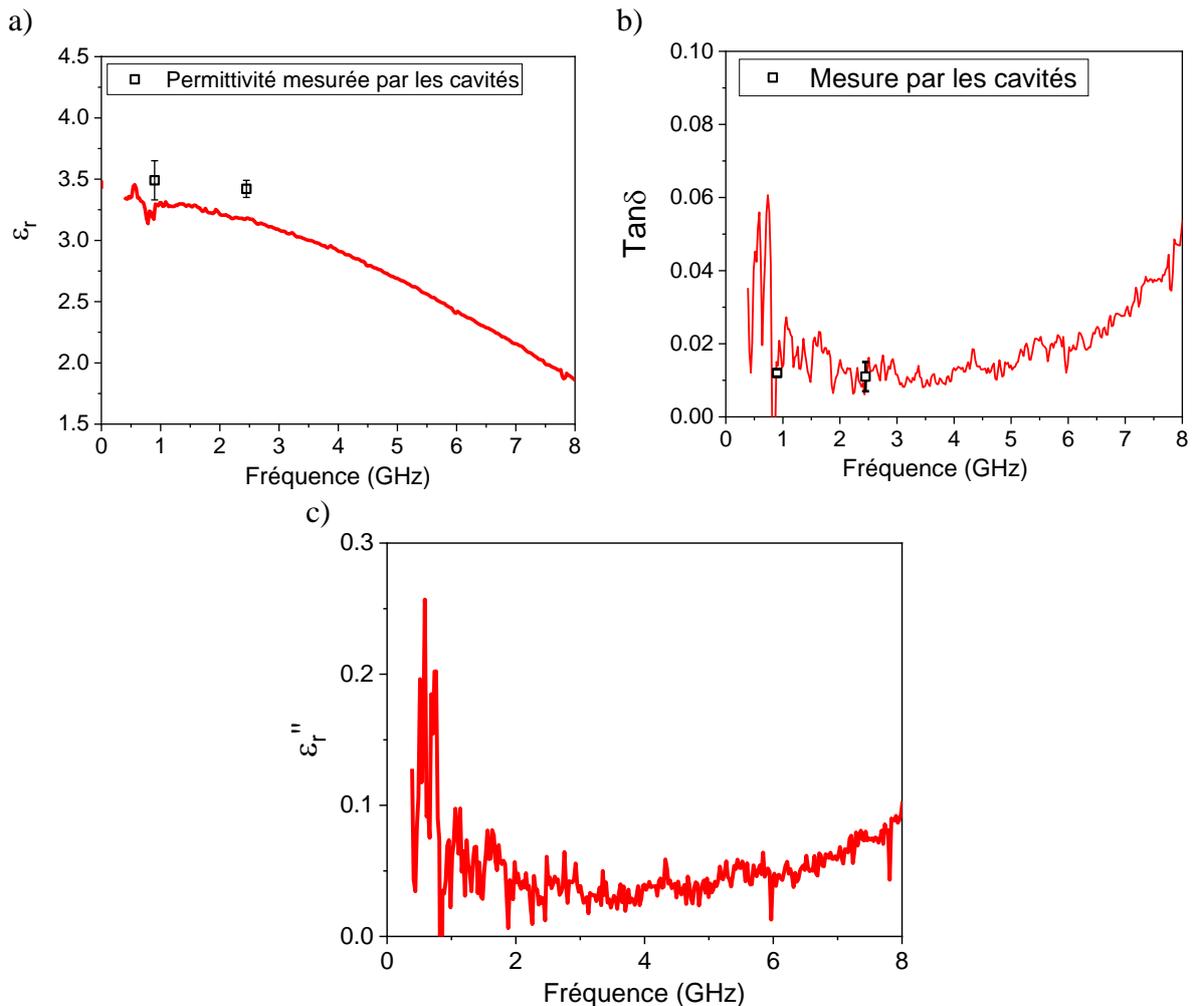


Figure III-18 : a) Permittivité relative (ϵ_r' ou ϵ_r) du substrat en fonction de la fréquence b) Perte du substrat en fonction de la fréquence c) Pertes relatives totales du matériau

III.3.2.2.a) Extraction des paramètres RLGC et de l'impédance caractéristique

Avec les paramètres primaires et secondaires de la ligne de transmission, il est possible de réaliser des simulations temporelles de fonctions électroniques ce qui, dans le cas de la plastronique, est particulièrement recherché. Dans ce paragraphe, nous allons extraire les paramètres RLGC et l'impédance avec deux méthodes différentes.

Les paramètres RLGC sont extraits à partir des paramètres S présentés en Figure III-16 et Figure III-17, avec la méthode de Mangan (mesures 1, 2 et 3) et la méthode LH (Figure III-19). Ces méthodes permettent d'obtenir les paramètres primaires et secondaires de la ligne de transmission en fonction de la fréquence. La méthode LH est appliquée sur la mesure 3 afin de la comparer avec la méthode de Mangan.

A partir de la simulation CST en 3D les paramètres RLGC sont extraits avec la méthode de Mangan. Une simulation sur Maxwell 2D est également réalisée et permet d'obtenir directement les paramètres C et G.

De manière générale la dispersion entre les mesures des lignes sont probablement majoritairement causées par des dimensions qui ne sont pas identiques (Tableau 47). Malgré ces disparités, les résultats de mesure restent proches et exploitables.

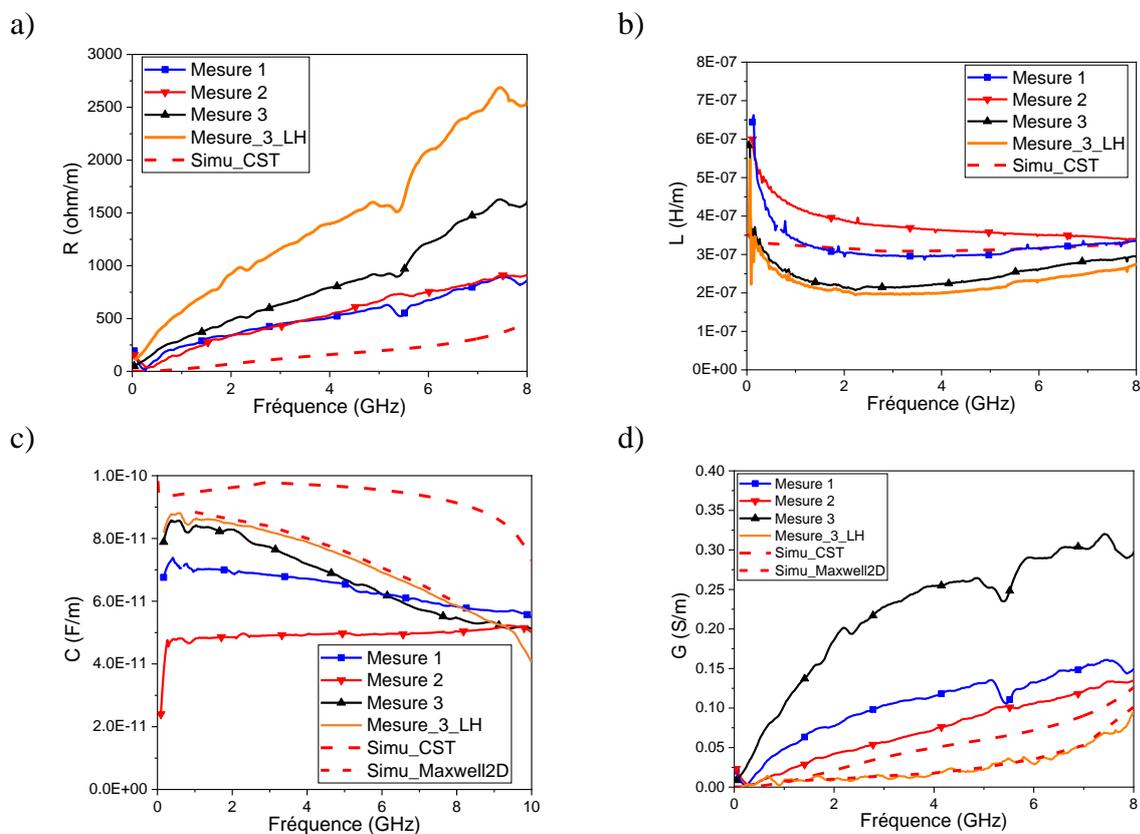


Figure III-19 : Paramètres RLGC mesurés et simulés (Mesure 1, 2 et 3 avec méthode de Mangan, Mesure_3_LH avec la méthode LH) a) R la résistance linéique b) L l'inductance linéique c) C la capacité linéique d) G la conductance linéique

La résistance linéique augmente en fonction de la fréquence car l'effet de peau agit avec la montée en fréquence. Pour l'extraction du paramètre R, les deux méthodes donnent des résultats différents : la méthode LH donne une résistance linéique plus élevée que celle obtenue par la méthode de Mangan. Dans le cas de lignes avec des sections importantes comme c'est le cas ici, le paramètre R est faible ce qui implique qu'il a moins d'impact que les paramètres L et C sur la mesure, notamment lorsque la fréquence augmente ou est élevée. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une méthode d'extraction plus précise que Mangan.

Pour l'inductance linéique, les deux méthodes d'extraction donnent des résultats similaires. La diminution de la valeur de l'inductance avec la fréquence entre 0,5 et 2 GHz est due à l'effet de peau.

Les deux méthodes d'extractions de la capacité linéique donnent des résultats légèrement différents. La simulation réalisée sur Maxwell 2D est proche des mesures extraites par la méthode LH. La simulation CST est éloignée du résultat de mesure, cela pourrait s'expliquer par une difficulté à mailler la structure 3D.

Les deux méthodes d'extraction diffèrent sur le résultat de la conductance linéique de manière importante. De la même façon que pour la résistance linéique, la conductance linéique est faible pour des lignes avec des sections importantes, la conductance a donc moins d'impact que L et C sur la mesure et nécessite une méthode d'extraction plus précise que celle de Mangan. La simulation réalisée sur Maxwell 2D et sur CST sont proches des mesures extraites par la méthode LH.

Les paramètres RLGC extraits sont proches des simulations Maxwell 2D. La simulation CST semble s'éloigner de la mesure ce qui peut s'expliquer par une difficulté à calculer l'effet de peau sur une structure 3D et la dispersion des dimensions des lignes de transmission coplanaire qui ne permet pas la reproduction exacte des dimensions.

Les paramètres RLGC ont été extraits par deux méthodes différentes qui donne des résultats du même ordre de grandeur, mais des différences sont observées, en particulier pour la résistance linéique et la conductance linéique. Il est recommandé de faire des comparaisons entre méthodes d'extraction, comme réalisé ici, pour s'assurer de résultats fiables sur des dispositifs nouveaux telles que ces lignes de transmission coplanaires. Il est important que la méthode utilisée soit précise si l'on souhaite utiliser ces résultats afin de pouvoir simuler des circuits plastroniques.

L'impédance caractéristique est ensuite calculée afin de s'assurer que l'interconnexion est adaptée à 50 Ω . L'impédance caractéristique est présentée en Figure III-20 en fonction de la fréquence. La partie réelle de l'impédance pour la méthode de Mangan est au-dessus de 50 Ω soit entre 59 et 68 Ω . La méthode LH donne une impédance de 50 Ω entre 1,6 et 4 GHz.

La partie imaginaire de l'impédance caractéristique calculée par la méthode de Mangan est proche de 0 ce qui montre une adaptation proche de 50 Ω . Les mesures 1, 2 et 3 correspondent et sont proches de la simulation CST. La méthode LH montre une partie imaginaire de l'impédance plus basse que la méthode de Mangan. Cette méthode étant plus précise, les pertes sont mieux prises en compte : les pertes du substrat, qui ont été extraites précédemment dans le paragraphe III.3.2.2.b) et les pertes résistives de la piste qui est moins conductrice que le cuivre (paragraphe II.5.1.3.c)).

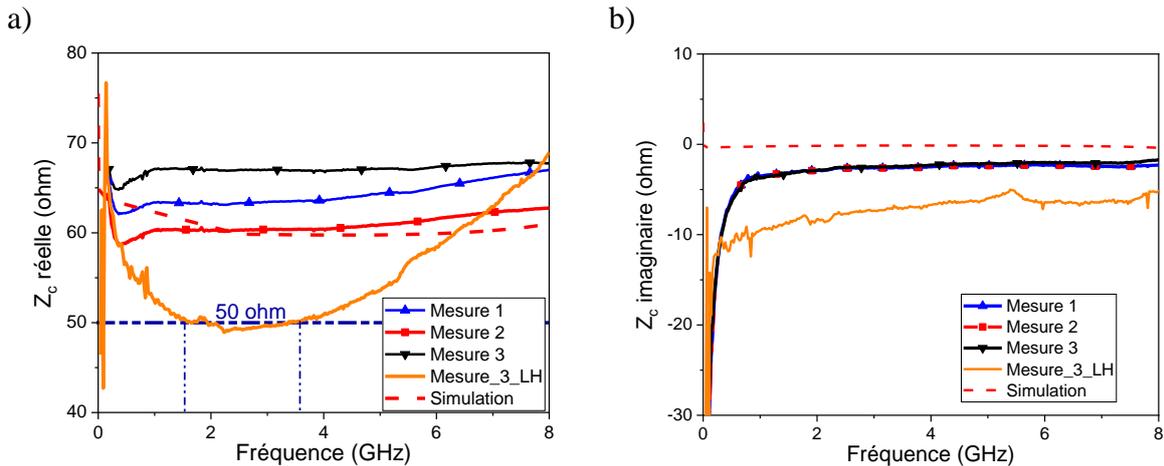


Figure III-20 : (Mesure 1, 2 et 3 avec méthode de Mangan, Mesure_3_LH avec la méthode LH) a) Impédance partie réelle des lignes de transmission coplanaires b) Impédance partie imaginaire des lignes de transmission coplanaires

La méthode LH est plus précise que la méthode de Mangan car modélise plus précisément les accès. Ainsi la mesure 3 des lignes coplanaires imprimées présente une adaptation à 50 Ω de 1,5 à 3,5 GHz et dépasse les 60 Ω à 6 GHz. Des applications sur la bande de fréquence 1,5 à 3,5 GHz sont envisageables avec ces lignes de transmission coplanaires imprimées.

III.3.2.2.b) Extraction du coefficient d'atténuation et de la constante de phase

Le coefficient d'atténuation (α) et de la constante de phase (β) sont calculés comme montré dans la partie III.1.3. Ce calcul permet de rendre compte de l'atténuation causée par les pertes totales de la ligne en fonction de la fréquence (conducteurs et diélectrique ensemble).

Sur la Figure III-21, l'extraction de α est présentée avec et sans la méthode LH. Une augmentation de α avec la fréquence est observée ce qui est logique compte tenu de l'effet de peau et des pertes du substrat (Figure III-18). D'après les paramètres RLGC obtenus précédemment, les lignes de transmission imprimées correspondent au modèle de lignes à minimisation des pertes car $\frac{R}{G} = \frac{L}{C}$ comme montré dans Annexe G. On a alors $\alpha = \sqrt{RG}$ [145].

Son augmentation s'explique alors par deux phénomènes :

- Le substrat présente des pertes qui augmentent en fonction de la fréquence. Ce phénomène est visible sur le graphe de G, la conductance, présenté précédemment
- Il y a également une augmentation des pertes dans le conducteur en fonction de la fréquence à cause de l'effet de peau comme montré sur le graphe de R, présenté précédemment

Le modèle de lignes à minimisation de pertes montre également que les lignes de transmission sont non dispersives.

Les méthodes de Mangan et LH présentent le même résultat de calcul de α car sa détermination est similaire dans les deux méthodes.

Les atténuations pour les mesures 1, 2 et 3 sont de même ordre de grandeur. Les différences peuvent principalement s'expliquer par la différence de dimensions des lignes

(Tableau 47) mais peuvent également s'expliquer par la résistance de contact entre le métal et les pointes qui varie à chaque posés de sonde RF sur la ligne de transmission coplanaire mesurée. Le coefficient d'atténuation est inférieur à 1 dB/mm ce qui témoigne d'une ligne de transmission fonctionnelle.

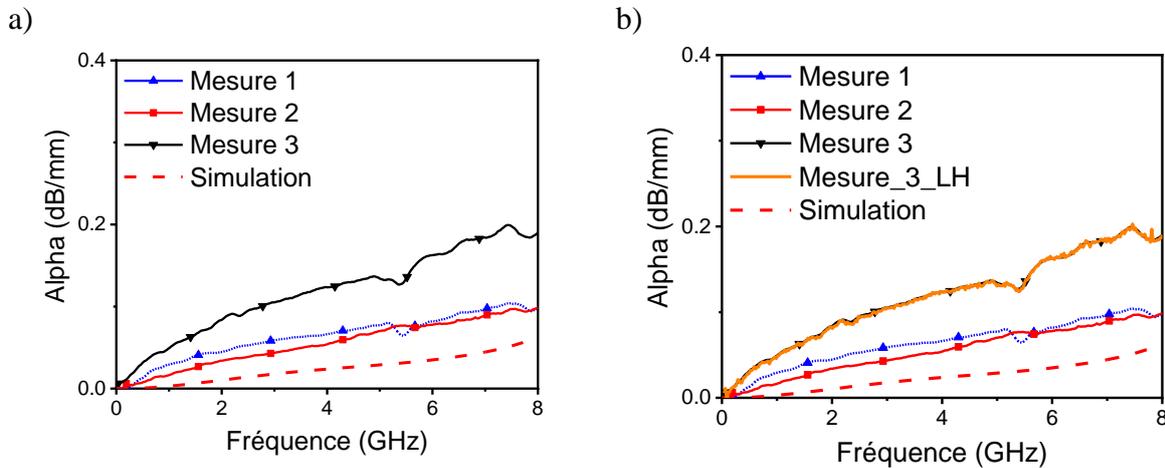


Figure III-21 : (Mesure 1, 2 et 3 avec méthode de Mangan, Mesure_3_LH avec la méthode LH) a) Mesures du coefficient d'atténuation réalisés avec une extraction de Mangan et simulation CST b) Ajout de l'extraction de la mesure 3 avec l'extraction de LH

Sur la Figure III-22 la constante de phase (β) est présentée. Celle-ci est quasiment linéaire pour chaque mesure, ce qui correspond bien au comportement connu d'une ligne de transmission qui propage un mode quasi TEM. La méthode LH montre le même résultat pour β que la méthode de Mangan.

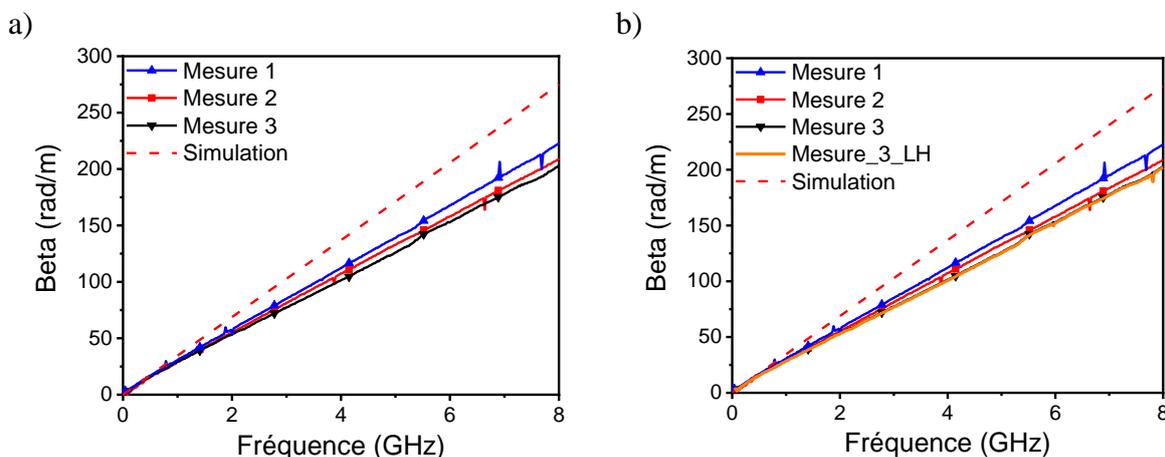


Figure III-22 : a) Mesures de la constante de phase réalisés avec une extraction de Mangan et simulation CST b) Ajout de l'extraction de la mesure 3 avec l'extraction de LH

D'après les résultats obtenus, les lignes imprimées sont avec pertes : une atténuation de $0,06 \pm 0,04$ dB/mm à 4 GHz et $0,1 \pm 0,07$ dB/mm à 8 GHz est mesurée.

III.3.2.2.c) Calcul de la vitesse de phase et de la permittivité effective

Lorsque la vitesse de phase est constante, les lignes sont non dispersives. La vitesse de phase est liée à β par la relation suivante [159] :

$$v_{\varphi} = \frac{2\pi f}{\beta} \quad (III.20)$$

On peut montrer aussi que v_{φ} est liée à la permittivité effective par la relation :

$$v_{\varphi} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (III.21)$$

La permittivité effective est un facteur de ralentissement de l'onde qui dépend des propriétés électriques de tous les matériaux composant la ligne de transmission coplanaire. La vitesse de phase et la permittivité effective extraites de la mesure sont présentées sur la Figure III-23. La vitesse de phase augmente puis devient constante à $2,26 \pm 0,15 \times 10^8$ m/s à partir de 2 GHz. La permittivité effective diminue puis se stabilise également. Cela confirme à nouveau que les lignes de transmission sont non-dispersives entre 2 et 8 GHz. Ce résultat montre qu'il est probablement possible de propager des signaux carrés sans déformations notables dues à la dispersion. Ces signaux carrés pourront alors être composés de sinusoïdes (DSE : développement en série de Fourier) dont les fréquences seront comprises entre 2 à 8 GHz.

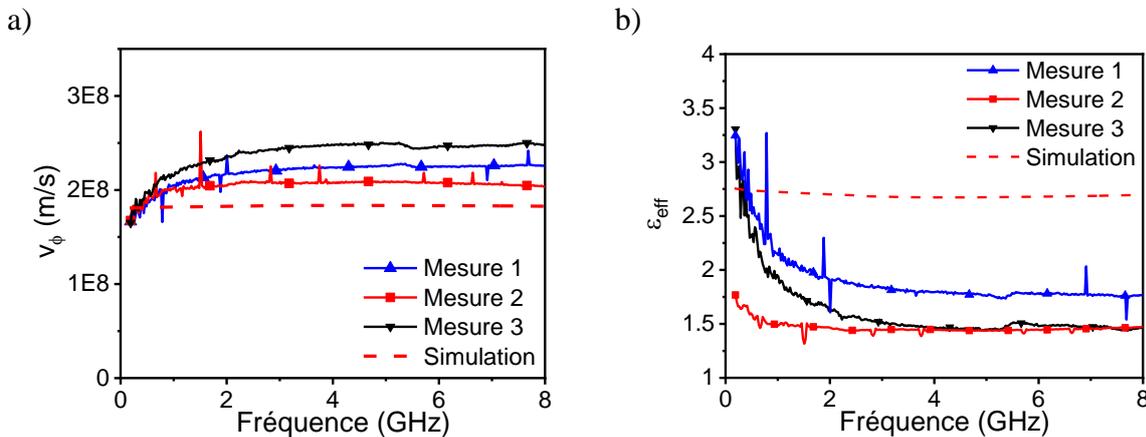


Figure III-23 : a) Vitesse de phase mesurée des lignes de transmission b) Permittivité effective

Pour conclure sur les paragraphes précédents : l'objectif de réaliser des lignes de transmission coplanaire d'impédance caractéristique de 50Ω est atteint pour les fréquences de 1,5 à 3,5 GHz. De plus, il est démontré que la méthode de Mangan et la méthode LH peuvent être utilisées pour calculer α et β . Cependant il est préférable d'utiliser la méthode LH pour l'extraction des paramètres RLGC et de l'impédance caractéristique Z_c .

III.3.2.2.d) Comparaison avec une ligne de transmission coplanaire sur cuivre

Pour mieux situer les performances des lignes de transmission imprimées, des comparaisons ont été réalisées avec celles que proposent des lignes réalisées à l'aide d'une technologie très connue et qui a fait ses preuves dans le domaine des hyperfréquences : les lignes en cuivre sur substrat Rogers 4003c ($\epsilon_r=3,55$ et $\tan\delta=0,0027$). Ces lignes de transmission coplanaire qui ont la même largeur de plan de masse et longueur que les lignes de transmission coplanaire imprimées en argent, mais G (Gap) et W (Width) et qui sont définis en Figure III-1, sont modifiées pour maintenir l'impédance caractéristique à 50Ω au regard de la technologie (matériaux différents) : $G=0,16$ mm et $W=2$ mm. Les dimensions mesurées sont reportées dans le Tableau 48, la rétrosimulation de ces dimensions montre une impédance égale à 52Ω .

Tableau 48 : Dimensions mesurées de lignes coplanaires en cuivre

G_{mg} (μm)	W_m (μm)	G_{md} (μm)
179 \pm 5	1992 \pm 4	175 \pm 3

En Figure III-24, les paramètres S sont présentés pour les lignes de transmission coplanaires courtes et longues en cuivre (Cu) et imprimées en argent (Ag). Le paramètre S_{11} , traduisant la réflexion, des lignes de transmission coplanaires en cuivre est plus faible que les lignes imprimées en argent en particulier à partir de 4 GHz pour les lignes de transmission courtes et longues. Le paramètre S_{21} , traduisant la transmission d'énergie, des lignes en cuivre est au-dessus des lignes imprimées en argent, pour les lignes de transmission courtes et longues.

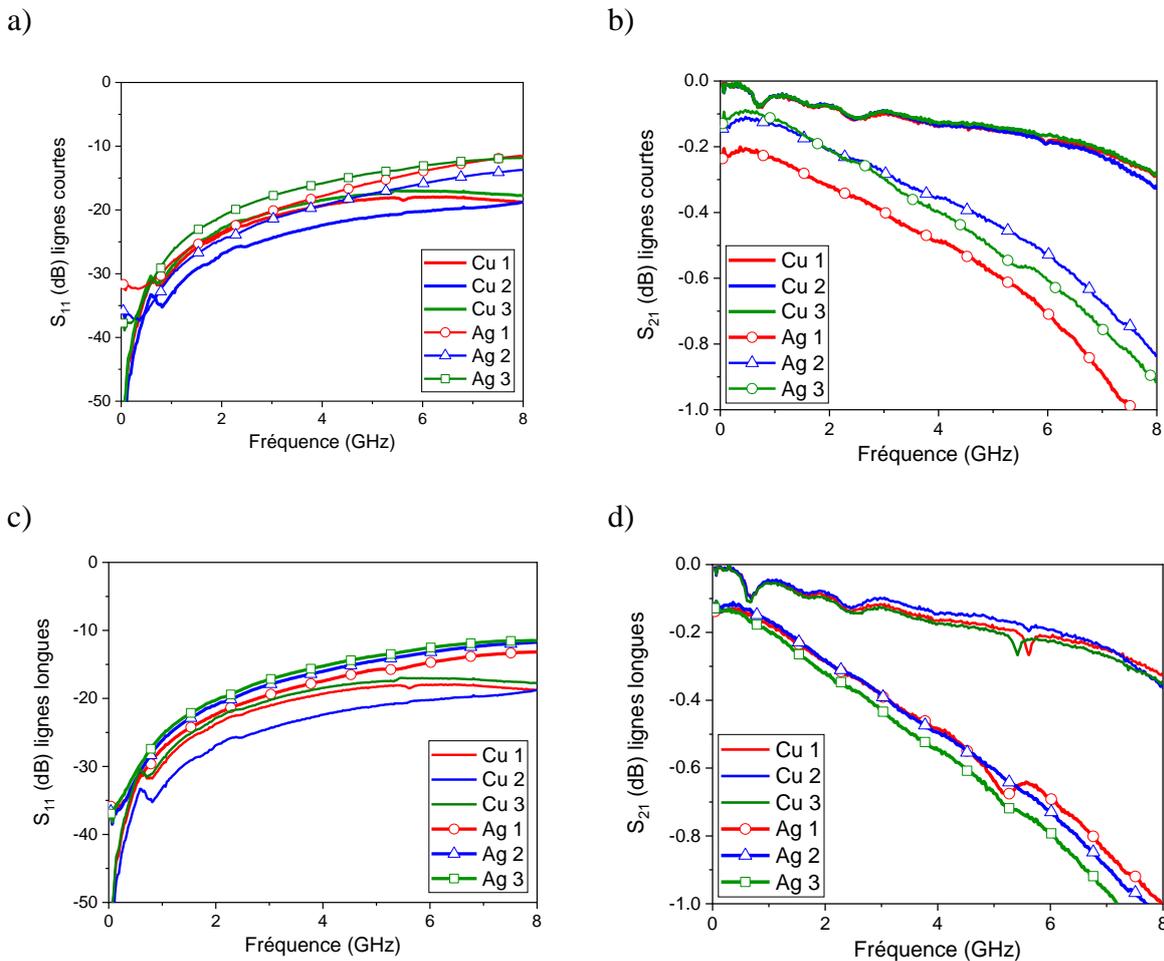


Figure III-24 : a) Paramètre S_{11} des lignes courtes en cuivre (Cu) et en argent (Ag) b) Paramètre S_{21} des lignes courtes c) Paramètre S_{11} des lignes longues d) Paramètres S_{21} des lignes longues

Les performances de transmission (S_{21}) sont meilleures pour les lignes en cuivre sur Rogers. Ce résultat peut s'expliquer par plusieurs critères. Tout d'abord, le procédé de fabrication par soustraction est connu et adapté à la création de dispositifs radiofréquences sur substrat Rogers, ce qui rend le dispositif plus facilement adaptable à 50 Ω . De plus, la conductivité du cuivre est plus élevée ($\sigma_{Cu}=5,8 \times 10^7$ S/m ; $\sigma_{Ag}=3 \times 10^6$ S/m) par rapport à celle de la ligne imprimée en argent. Les pertes du substrat Rogers sont également très faibles ($\tan\delta_{Ro}=0,0027$; $\tan\delta_{PC+ABS}=0,021$) par rapport à celles du substrat plastique qui n'a pas été

développé et optimisé pour des applications radiofréquences. Afin de montrer cela, en Figure III-25 les paramètres RLGC des CPW en cuivre sur Rogers (Cu) et celles imprimées (Ag) extraits par la méthode de Mangan sont présentés.

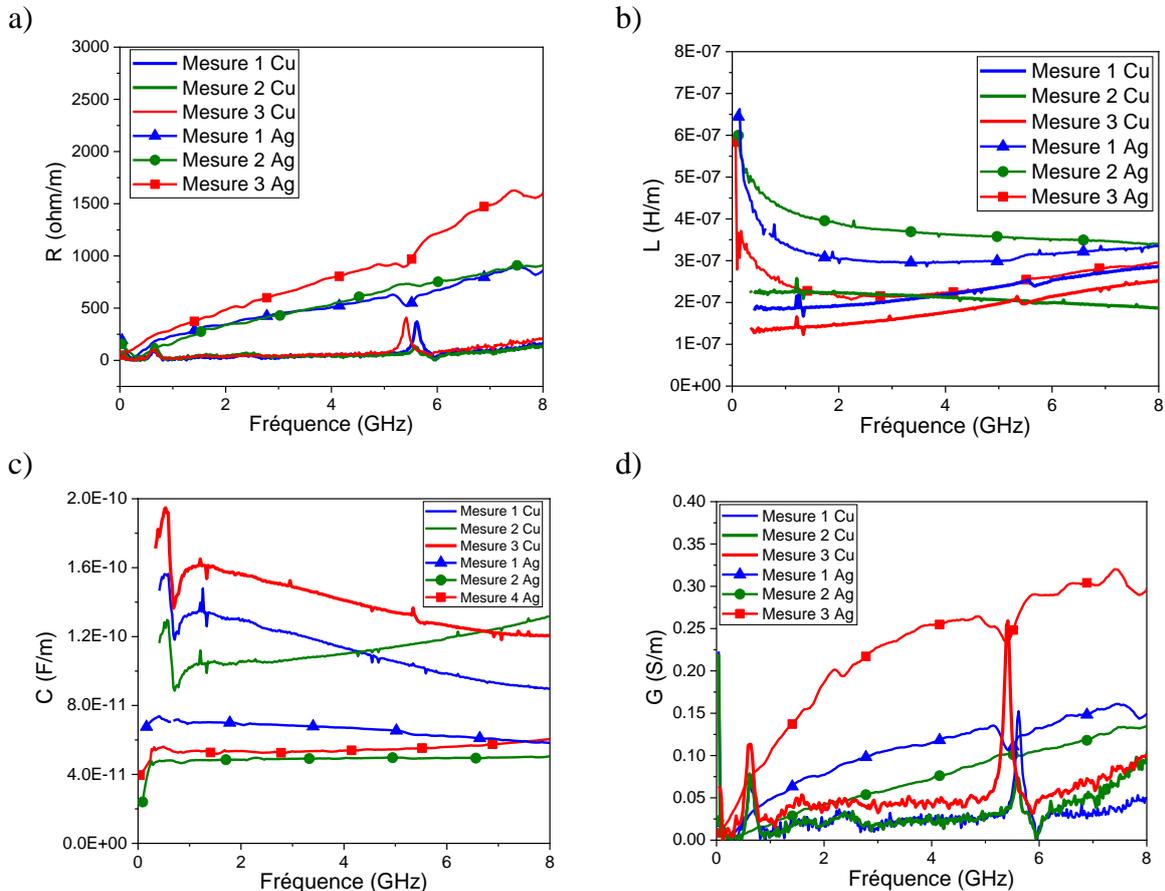


Figure III-25 : Comparaison entre CPW imprimées en encre argent (Ag) et CPW en cuivre sur Rogers (Cu) des paramètres a) R b) L c) C d) G

La résistance linéique des lignes en cuivre est plus faible que celle des lignes imprimées : à 8 GHz la résistance linéique des lignes imprimées avec de l'encre argent est 6 fois plus élevée que les lignes en cuivre. Cela traduit moins de pertes pour les lignes en cuivre dans le conducteur.

De même, la conductance linéique des lignes en cuivre est plus faible que celle des lignes imprimées : à 8 GHz la conductance linéique des lignes imprimées est 2,3 fois plus élevée que les lignes en cuivre. Cela traduit moins de pertes pour les lignes en cuivre dans le substrat.

Le coefficient d'atténuation et la constante de phase sont extraits avec la méthode de Mangan et sont présentés en Figure III-26. Le coefficient d'atténuation du cuivre est plus faible que les lignes imprimées en argent : en moyenne α_{Cu} est 8 fois plus faible que α_{Ag} à 2 GHz et 4 fois plus faible à 8 GHz. La différence entre les atténuations est plus faible à partir de 6 GHz car l'atténuation augmente pour les lignes en cuivre à partir de cette valeur.

L'atténuation plus importante pour les lignes imprimées que pour les lignes en cuivre s'explique par des pertes plus importantes pour les lignes imprimées que pour les lignes en cuivre comme montré avec les paramètres RLGC ($R_{ag} \gg R_{cu}$ et $G_{ag} \gg G_{cu}$).

La différence entre les constantes de phase des lignes en cuivre et des lignes imprimées est petite car β tend vers $\omega\sqrt{LC}$ (pour des lignes à faible perte) [145]. Or, comme montré sur les graphes des paramètres RLGC, le paramètre L est du même ordre de grandeur pour les lignes en cuivre et imprimées cependant le paramètre C est plus élevé pour les lignes en cuivre. Cela explique alors une constante de phase légèrement plus élevée pour les lignes en cuivre.

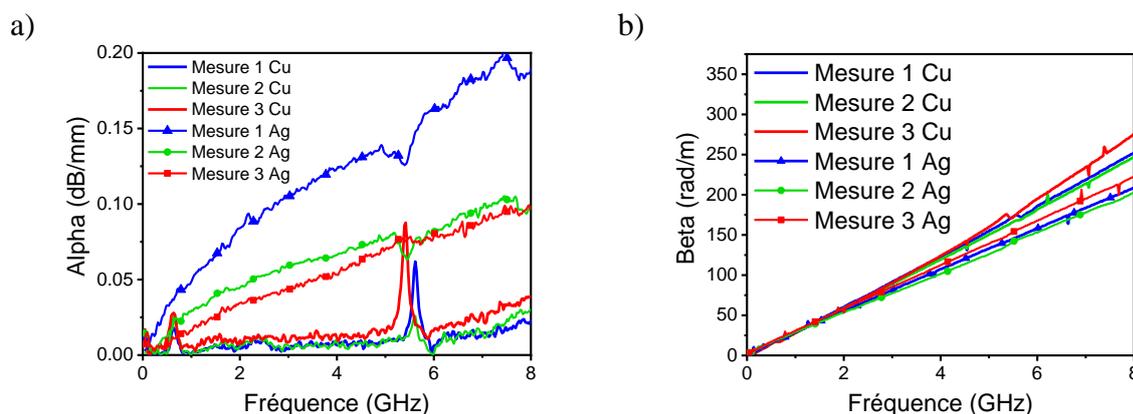


Figure III-26 : a) Coefficient d'atténuation α des lignes en cuivre (Cu) et des lignes imprimées en argent (Ag) b) Constante de phase β des lignes en cuivre et des lignes imprimées en argent

La vitesse de phase est calculée à partir de β (Figure III-20) et est montrée en Figure III-27. Les lignes imprimées présentent une vitesse de phase plus élevée que les lignes en cuivre de $2,8 \times 10^7$ m/s en moyenne de 0,1 à 8 GHz.

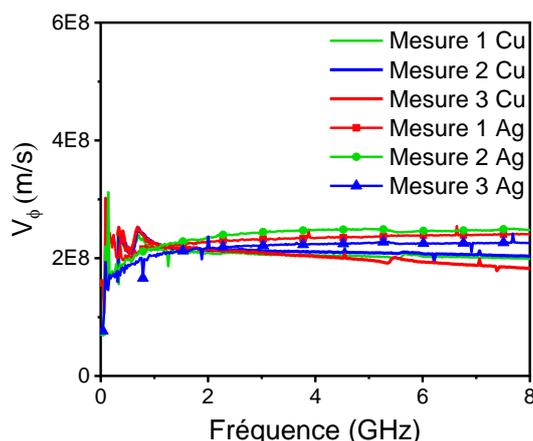


Figure III-27 : Comparaison de la vitesse de phase des lignes imprimées en argent (Ag) et des lignes en cuivre (Cu)

Ainsi, une évaluation des performances de la ligne imprimée par rapport à une ligne en cuivre est obtenue : de 0,1 à 8 GHz les lignes imprimées atténuent l'onde en moyenne 7 ± 3 fois plus que les lignes en cuivre. Les lignes imprimées présentent une vitesse de phase plus élevée de 14 % plus que les lignes en cuivre.

III.3.2.2.e) Conclusion de la caractérisation radiofréquence

Dans cette partie, les paramètres S des lignes coplanaires de transmission ont été mesurés. A partir de ces paramètres, une extraction des paramètres RLGC, de l'impédance caractéristique, du coefficient d'atténuation et de la constante de phase est réalisée selon deux méthodes. La comparaison de ces deux méthodes est importante pour vérifier les résultats pour des dispositifs nouveaux.

Concernant les paramètres RLGC extraits, ces deux méthodes donnent des résultats du même ordre de grandeur, mais des différences sont observées, en particulier pour la résistance linéique et la conductance linéique. La méthode LH est plus précise que la méthode de Mangan pour l'extraction de ces paramètres. Ainsi la mesure extraite par la méthode LH montre une adaptation des lignes coplanaires imprimées à 50Ω de 1,5 à 3,5 GHz et dépasse les 60Ω à 6 GHz. Des applications sur la bande de fréquence 1,5 à 3,5 GHz sont envisageables avec ces lignes de transmission coplanaires imprimées.

Ces lignes imprimées sont montrées avec pertes et présentent une atténuation de $0,06 \pm 0,04$ dB/mm à 4 GHz et $0,1 \pm 0,07$ dB/mm à 8 GHz est mesurée. Celles-ci sont également non dispersives entre 2 et 8 GHz. Ce résultat montre qu'il est probablement possible de propager des signaux carrés sans déformations notables dues dispersion.

Une évaluation des performances de la ligne imprimée par rapport à une ligne en cuivre est obtenue : de 0,1 à 8 GHz les lignes imprimées atténuent l'onde en moyenne 7 ± 3 fois plus que les lignes en cuivre. Les lignes imprimées présentent une vitesse de phase plus élevée de 14 % plus que les lignes en cuivre.

Ce travail débute la modélisation de dispositifs plastroniques qui peut être utile pour simuler et faire des analyses prédictives de futurs dispositifs plastroniques.

Des pistes d'études sont présentées en Annexe I afin d'adapter les lignes coplanaires pour le procédé jetting. Notamment, l'impression des rubans de masse est consommateur d'encre et prend du temps ainsi nous proposons de réaliser des rubans de masse maillés.

III.4. Caractérisation de lignes de transmission coplanaire sur plan incliné

III.4.1. Contexte de l'étude

Afin de réaliser des dispositifs sur des substrats 3D, il est nécessaire dans un premier temps d'étudier les dispositifs imprimés sur des surfaces inclinées. En effet, l'encre peut s'étaler différemment sur les surfaces 3D, il est donc important de vérifier si cela a un impact sur son comportement en radiofréquence. Dans cette étude, une comparaison des paramètres S de lignes de transmission coplanaires imprimées à l'horizontale, à 45° et à 90° est effectuée. Ce travail a été accepté à la conférence Eucap 2022.

III.4.2. Matériels et méthodes

Les lignes de transmission sont imprimées sur le substrat PC+ABS (paragraphe III.2.1.1.b)) avec le système d'impression jetting monté sur le robot 6 axes. L'encre Henkel

Electrodag 418SS à microparticules d'argent est utilisée (paragraphe II.3.1). Pour cette étude, des cales sont utilisées pour incliner les substrats à 45° et à 90°, comme montré en Figure III-28.

L'impression est réalisée en orientant le système d'impression toujours à 90° par rapport à la surface du support à imprimer comme illustré en Figure III-28. Un recuit à 90°C durant 30 min est réalisé.

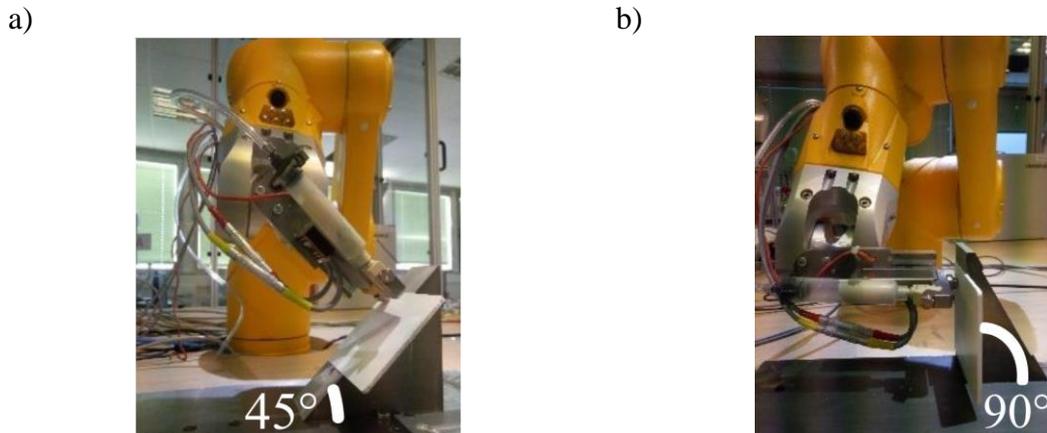


Figure III-28 : Photographies de l'impression de lignes coplanaires de transmission sur des plaques thermoplastiques positionnées avec a) Une cale à 45° b) Une cale à 90°

Les mesures radiofréquences sont réalisées avec la station sous pointe que l'on associe au VNA comme présenté dans le paragraphe III.2.1.

III.4.3. Résultats des mesures et de la modélisation

Une modélisation sur ADS permet d'obtenir les dimensions suivantes pour les lignes de transmission coplanaires avec une adaptation à 50 Ω : $W=1,860$ mm, $G=200$ μm et de longueur 4 et 5 mm.

Après impression des lignes de transmission coplanaires, les dimensions G_{mg} , W et G_{md} comme définies en Figure III-15, sont mesurées. Malgré une déviation par rapport au résultat de la modélisation, l'impédance caractéristique rétrosimulée est correcte :

- 50 ± 7 Ω pour les lignes de transmission coplanaires imprimées à l'horizontale
- 51 ± 1 Ω pour celles inclinées à 45°
- 49 ± 2 Ω pour celles inclinées à 90°

Tableau 49 : Dimensions des lignes de transmission coplanaires imprimées à plat et sur des plans inclinés

	G_{mg} (μm)	W (μm)	G_{md} (μm)	Epaisseur (μm)
Horizontal	166±42	1693±37	202±46	39±6
A 45°	193±11	1664±16	198±3	38±1
A 90°	177±14	1697±16	183±5	35±2

Les paramètres S des lignes de transmission coplanaires sont mesurés et présentés en Figure III-29. Il y a un bon accord entre les mesures sur substrat horizontal, incliné à 45° et à

90°. La différence avec la simulation peut s'expliquer avec l'effet de la résistance de contact entre les pointes et la ligne de transmission coplanaire.

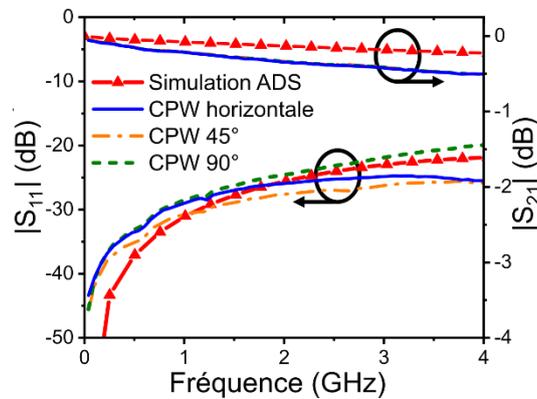


Figure III-29 : Module des paramètres S_{11} et S_{21} des lignes de transmission coplanaire imprimées à l'horizontal ou inclinées (mesure et simulation)

Les résultats montrent qu'un même dispositif peut être reproduit par le procédé sur des surfaces inclinées ou horizontales avec des paramètres S similaires. Ainsi, pour des lignes coplanaire de transmission, il ne semble pas y avoir d'impact sur les paramètres S.

III.5. Conception et caractérisation de lignes coplanaire en 3D

III.5.1. Contexte

Pour concevoir des dispositifs RF en 3D, il est important de connaître le comportement de ceux-ci sur des surfaces 3D. Dans cette partie, la transmission du signal sur des surfaces 3D et en particulier sur des angles est étudiée. L'intérêt est de pouvoir amener le signal jusqu'à une antenne par exemple qui serait située à un endroit de l'objet 3D difficilement accessible, pour des contraintes de miniaturisation par exemple. Pour cela des lignes coplanaire en 3D sont réalisées avec la technologie jetting 3D. De plus, les lignes coplanaire sont des éléments souvent utilisés pour concevoir des composants passifs (comme par exemple des filtres), les avoir à disposition permet également d'évaluer leurs performances pour d'autres utilisations en 3D.

Sur la Figure III-30 des applications de lignes coplanaire 3D sont illustrées. Les outils connectés en industrie sont utilisés pour repérer facilement et rapidement l'outil. Une antenne GPS peut être positionnée sur tous types d'objets avec le jetting 3D, ici l'antenne est positionnée sur une face suffisamment grande et le signal est apporté par une ligne coplanaire 3D.

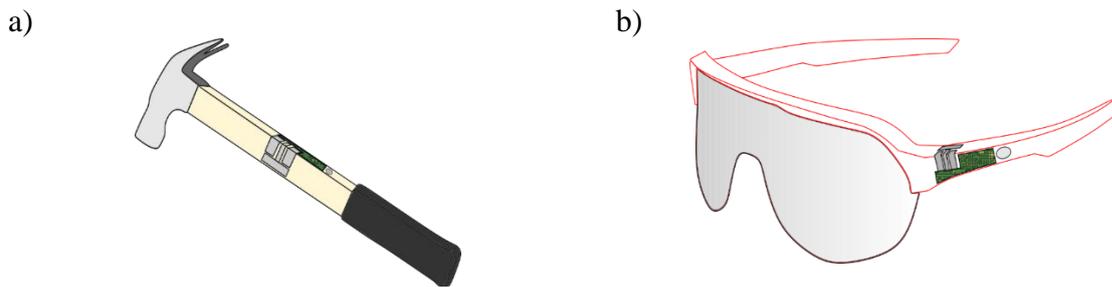


Figure III-30 : a) Marteau connecté pour envoi de position GPS afin de localiser l'outil b) Lunettes connectées

Les lunettes connectées sont une application pour laquelle la miniaturisation et l'allègement du poids sont importants. Ainsi les technologies IDE peuvent être utiles car elles permettent un allègement en enlevant les fils de connexion par exemple. Les surfaces sont petites sur ces lunettes ainsi le circuit contenant la source et les batteries sont intégrées sur l'avant des lunettes et l'antenne est imprimée directement sur la branche en étant relié par une ligne coplanaire 3D.

III.5.2. Réalisation du prototype en 3D

III.5.2.1. Conception du prototype

Les lignes coplanaires 3D doivent répondre à un cahier des charges spécifique lié aux procédés mis en œuvre :

- La mesure RF sous sondes RF doit être possible : la mesure doit pouvoir s'effectuer à plat avec le pitch adéquat.
- Le dispositif doit être imprimable en jetting 3D : la surface doit être peu rugueuse, les angles doivent être gérables par le robot et la tête d'impression, et le maintien de la qualité de l'impression sur tout le dispositif doit être possible.

Pour répondre à ces contraintes, des ailettes ont été ajoutées afin de pouvoir poser les pointes à plat et éloigner les pointes des pentes afin d'éviter un couplage éventuel, comme présenté sur la Figure III-31a). Ces ailettes font apparaître deux angles A_1 et A_2 .

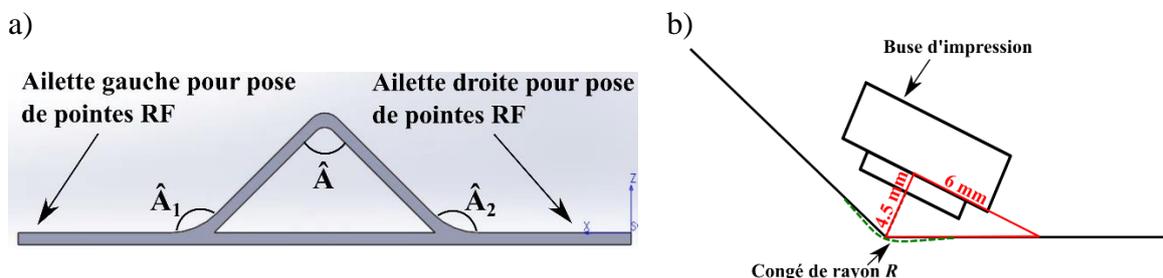


Figure III-31 : a) Schéma du support destiné à être imprimé avec des lignes coplanaires 3D b) Géométrie pour le calcul du rayon des congés A_1 et A_2

Les congés des angles A_1 et A_2 doivent être calculés pour que l'encombrement de la tête permette le maintien de la distance d'impression tout au long de l'impression. La géométrie pour calculer le rayon R des congés des angles est présentée en Figure III-31b), il vient :

$$R = \frac{4,5}{\sqrt{2}(1 - \frac{\sqrt{2}}{2})} = 10,9 \text{ mm} \quad (III.22)$$

Ainsi les congés des angles A_1 et A_2 sont réalisés avec le rayon R .

L'angle \hat{A} présente également un congé de 5 mm nécessaire pour le passage du robot. \hat{A} prend la valeur 90° et 130° pour pouvoir comparer la transmission sur ces deux angles.

Les dimensions du substrat sont présentées sur la Figure III-32. Une épaisseur de 2 mm de substrat est maintenue le long de la ligne coplanaire. Les ailettes sont de 30 mm ainsi que les côtés du triangle, pour une longueur totale d'environ 120 mm. Ces dimensions sont maintenues pour un angle \hat{A} de 90° ou de 130° .

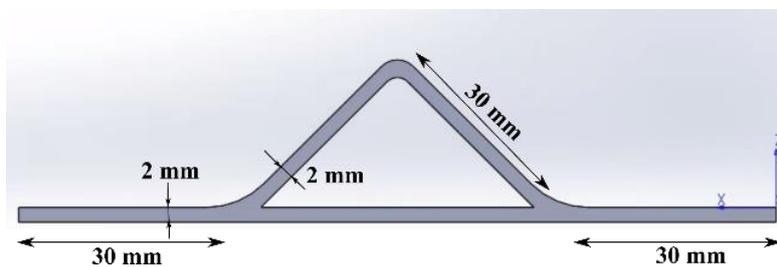


Figure III-32 : Dimensions du substrat d'impression des lignes coplanaire 3D

A présent que le substrat a été conçu pour répondre aux contraintes d'impression, il est possible de réaliser une simulation du prototype.

III.5.2.2. Simulation du prototype

Dans le Tableau 50, la permittivité et $\tan\delta$ mesurées par la méthode des cavités sont présentées. Les mesures sont réalisées à ces fréquences car elles sont dans la gamme de fréquence des mesures RF réalisées par la suite (0 à 8 GHz). Ces valeurs sont utilisées pour les simulations.

Tableau 50 : Permittivité et $\tan\delta$ du substrat POM

Fréquence (GHz)	0,9	2,45
Permittivité	2,88±0,29	2,79±0,27
Tanδ	0,048±0,003	0,032±0,002

Une simulation sur ADS est réalisée afin d'adapter les lignes sur les ailettes. Il est probable qu'une désadaptation ait lieu au niveau des angles, cela sera étudié lors de la caractérisation. La simulation ADS donne $W = 1,3 \text{ mm}$ et $G = 0,177 \text{ mm}$ pour une adaptation 50Ω .

Une simulation sur CST est réalisée en complément afin de prendre en compte les formes 3D. Le fichier STL de la pièce réalisée par usinage est importé dans CST. La ligne coplanaire imprimée est dessinée sur le substrat importé comme montré en Figure III-33. Les ports sont positionnés à l'endroit de pose des pointes.

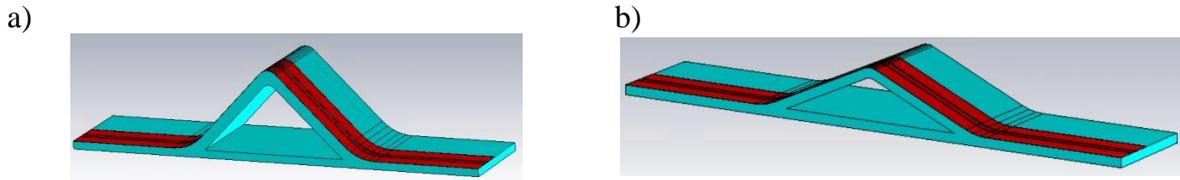


Figure III-33 : Simulation de la ligne coplanaire sur substrat avec angle a) À 90° b) À 130°

La simulation sur CST montre les paramètres S présentés sur la Figure III-34. Ceux-ci sont peu différents pour les angles 90° et 130°. Le paramètre S11 est en dessous de -5 dB de 0 à 8 GHz. Le paramètre S12 est au-dessus de -6 dB de 0 à 8 GHz. Les décalages s'expliquent aisément par la différence de l'angle entre les deux lignes : cela crée des discontinuités différentes pour les deux angles.

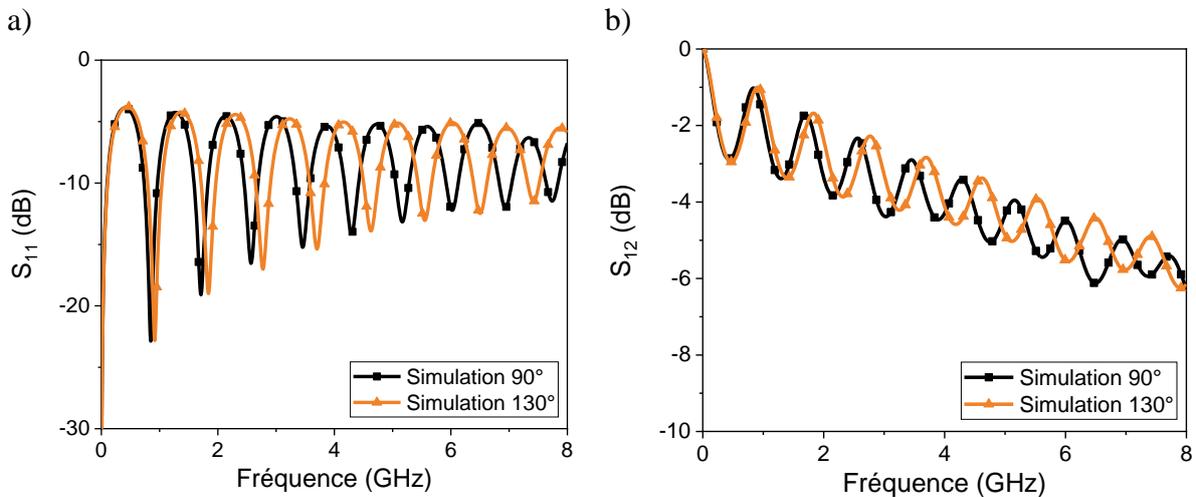


Figure III-34 : a) Paramètres S11 des lignes coplanaires sur substrat avec angles à 90° et 130° b) Paramètres S12 des lignes coplanaires sur substrat avec angles à 90° et 130°

III.5.2.3. Méthode pour l'impression

III.5.2.3.a) Fabrication du substrat

La fabrication du substrat est réalisée par usinage. Le substrat est un plastique polymère POM (polyoxyméthylène) de rugosité $(0,690 \pm 0,122 \mu\text{m})$. Avec cette technique de fabrication le substrat en triangle est évidé en surfaçant l'intérieur puis les contours sont ensuite découpés. La taille de la fraise (6 mm) ne permet donc pas de faire des angles « pointus » comme montré sur la Figure III-35.

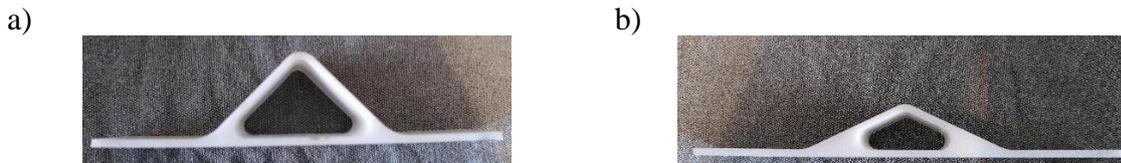


Figure III-35 : Substrat POM utilisé pour l'impression des lignes coplanaires a) À 90° b) À 130°

III.5.2.3.b) Impression de la ligne coplanaire

L'impression est réalisée avec le robot 6 axes Stäubli portant le système d'impression Vermes. L'encre Electrodag 418SS de Henkel est utilisée. Un support de fixation est réalisé en aluminium afin de brider le substrat lors de l'impression et il permet aussi de positionner de la même façon les différents échantillons pour assurer une impression reproductible.

La programmation de la trajectoire est similaire à celle mise en œuvre pour imprimer les lignes coplanaires en 2D, cependant la gestion de l'angle de la tête d'impression est ajoutée.

Le système d'impression utilise le jeu de paramètres optimisé défini dans le Chapitre II. La vitesse d'impression est réduite à 10 mm/s, t_{delay} est calculé par l'équation (II.1). Les paramètres d'impression sont présentés le Tableau 51.

Tableau 51 : Paramètres d'impression utilisés pour les lignes coplanaires 3D

t_{ris} (ms)	t_{open} (ms)	t_{fall} (ms)	t_{delay} (ms)	NL	v_{print} (mm/s)	d_{print} (mm)
0,4	2,5	0,8	27	80%	10	1,5

La trajectoire est formée de 12 points, chacun décrivant les coordonnées du point et l'orientation de la tête d'impression, comme montré en Figure III-36. Le système d'impression est orienté de manière à être toujours perpendiculaire à la surface de la pièce pour former correctement la goutte sur le substrat. Comme pour les lignes coplanaires en 2D, ces points sont décalés à chaque itération pour former des aplats (Figure III-14).

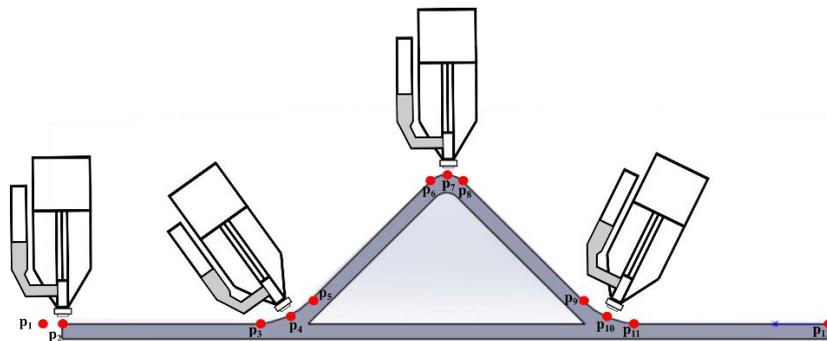


Figure III-36 : Orientation du système d'impression pour chaque point de la trajectoire

Les paramètres de programmation de l'impression (explicités dans le Tableau 45) sont présentés dans le Tableau 52 afin de respecter les dimensions données par la simulation.

Tableau 52 : Paramètres d'impression des lignes coplanaires en 3D

	$nbre_iter_pm$	$nbre_iter_ligne$	G_robot	l_{line}	$inter$
Valeurs	10	2	1,1 mm	129 mm	0,4 mm

Dans le programme du robot, la vitesse au niveau de l'angle utilisé est la vitesse de rotation, celle-ci est calculée par la formule suivante :

$$v = R\theta \quad (III.23)$$

Avec :

- v la vitesse linéaire (m/s)
- R le rayon du congé (m)
- θ la vitesse de rotation (rad/s)

Dans le cas des lignes coplanaires 3D : $v=10$ mm/s, $R=5$ mm ainsi $\theta=2$ rad/s.

Un recuit de 90°C pendant 30 min est réalisé. La Figure III-37 montre les lignes coplanaires 3D recuites.

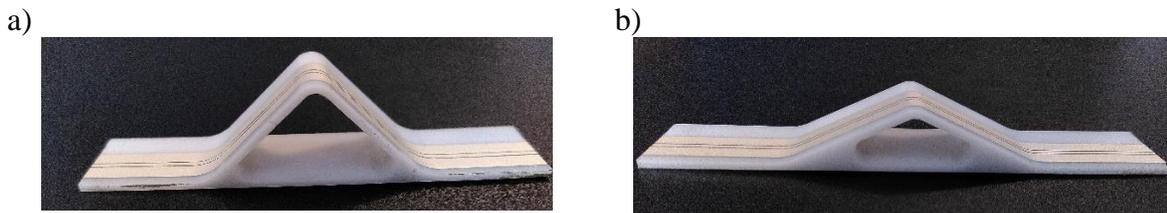


Figure III-37 : Ligne coplanaire 3D imprimée sur un angle a) À 90° b) À 130°

III.5.3. Caractérisation du prototype en 3D

III.5.3.1. *Caractérisation morphologique des lignes imprimées sur substrat 3D*

La caractérisation morphologique est réalisée avec une loupe binoculaire et un profilomètre mécanique sur les lignes imprimées sur des substrats 3D. Sur la Figure III-38 des clichés des lignes sont montrés, sur une zone imprimée à plat et au sommet de la pièce (sur un angle).

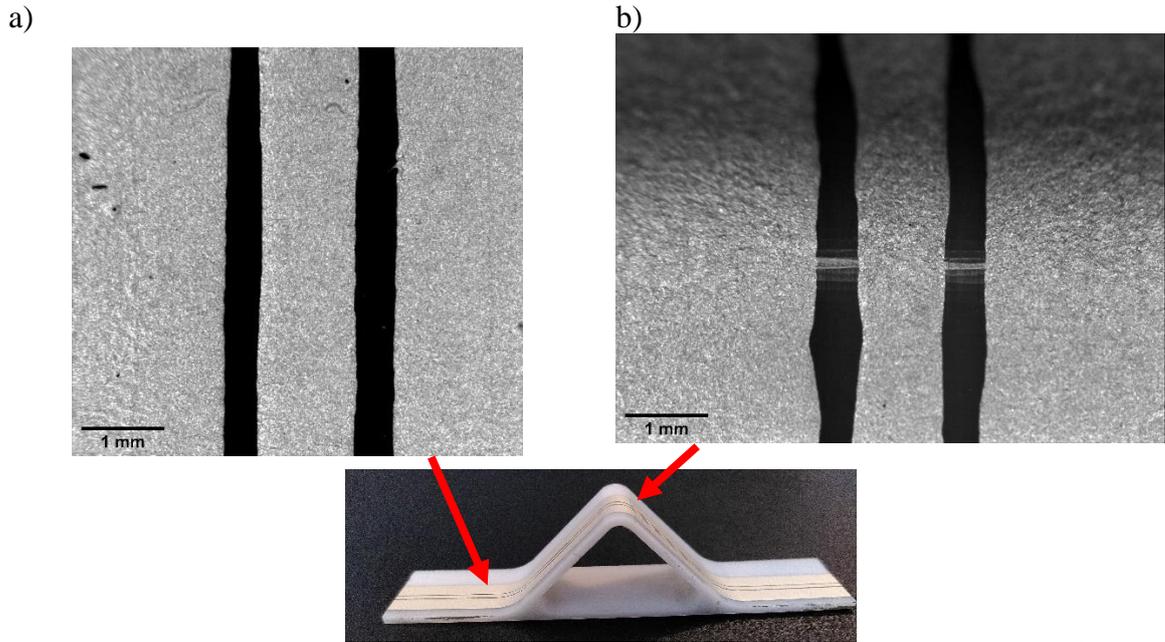


Figure III-38 : Clichés pris à la loupe binoculaire de la ligne coplanaire imprimée 3D avec un angle \hat{A} de 90° a) Sur les ailettes b) Au sommet

Les moyennes des mesures du gap et de la largeur de ligne pour 40 mesures sont présentées dans le Tableau 53. Par rapport aux lignes coplanaires 2D, les lignes coplanaires 3D sont plus rectilignes : en moyenne les écarts types sont plus faibles ($\pm 26 \mu\text{m}$ pour les lignes 3D et $\pm 39 \mu\text{m}$ pour les lignes 2D). Deux facteurs peuvent expliquer cela :

- La réduction de la vitesse à 10 mm/s par rapport à 35 mm/s pour les lignes coplanaires 2D
- Le substrat POM possède une énergie de surface supérieure au PC+ABS ($49,6 \text{ mN/m}$ [160] pour 35 à 42 mN/m [161,162]) ce qui modifie son interaction avec l'encre déposée.

L'épaisseur moyenne mesurée sur les ailettes est de $35,4 \pm 6 \mu\text{m}$.

Tableau 53 : Mesure des gaps et largeur de lignes des lignes coplanaires 3D imprimées avec un recouvrement OL_L et OL_W de 50%

	$G_{mg} \text{ gauche } (\mu\text{m})$	$W_m (\mu\text{m})$	$G_{md} \text{ droit } (\mu\text{m})$
$90^\circ n \cdot 1$	305 ± 39	1263 ± 46	432 ± 31
$90^\circ n \cdot 2$	240 ± 54	1346 ± 31	340 ± 16
$130^\circ n \cdot 1$	408 ± 19	1162 ± 26	472 ± 19
$130^\circ n \cdot 2$	344 ± 19	1207 ± 21	369 ± 24
Moyenne	324 ± 70	1244 ± 79	404 ± 60

Le sommet de la ligne coplanaires 3D est plus irrégulier que la piste sur les ailettes, cela peut être causé par la discontinuité du mouvement et la transition entre vitesse linéaire et vitesse de rotation effectué par le robot.

Les dimensions des lignes coplanaires permettent de réaliser la mesure (le pitch des pointes est respecté), comme attendu.

III.5.3.2. *Caractérisation radiofréquence des lignes imprimées sur substrat 3D*

III.5.3.2.a) Paramètres S des lignes imprimées sur substrat 3D

La mesure est réalisée avec le matériel décrit dans la partie III.2. Les sondes radiofréquences sont posées à plat grâce aux ailettes.

Les paramètres S mesurés sont présentés sur la Figure III-39. Les paramètres S11 sont en dessous de -5 dB ce qui montre une adaptation éloignée de 50 Ω . La phase du paramètre S21 pour l'angle à 90° et 130° ne présentent pas de courbe linéaire ce qui montre les discontinuités créées par les angles.

La différence entre les mesures et les simulations pourrait s'expliquer par l'action des pointes de mesures qui n'est pas prise en compte dans la simulation.

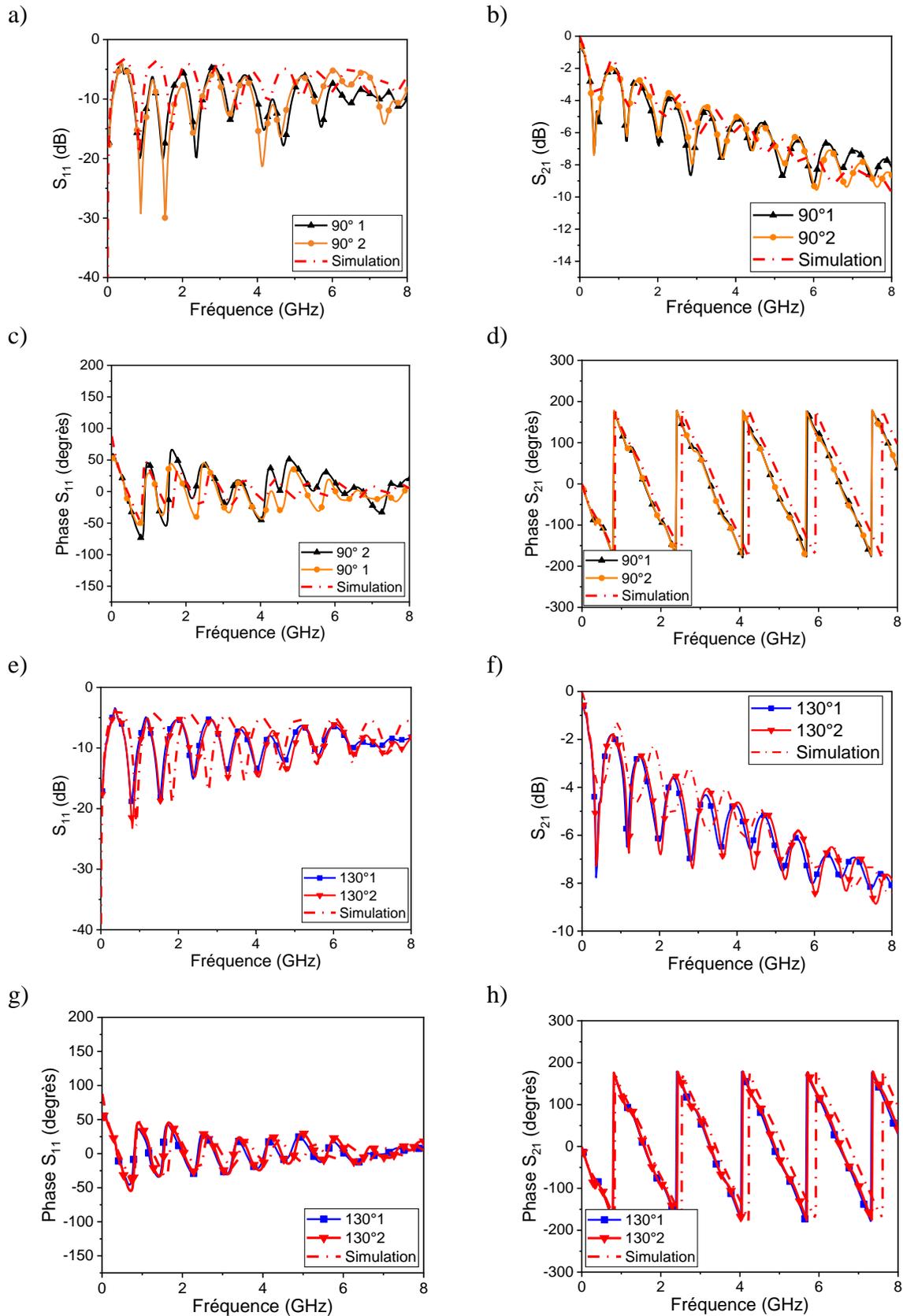


Figure III-39 : a) Module du paramètre S_{11} b) Module du paramètre S_{21} c) Phase du paramètre S_{11} d) Phase du paramètre S_{21} mesurés et simulés des lignes coplanaires en 3D sur des angles à 90° e) Module du paramètre S_{11} f) Module du paramètre S_{21} g) Phase du paramètre S_{11} h) Phase du paramètre S_{21} mesurés et simulés des lignes coplanaires en 3D sur des angles à 130°

Afin de pouvoir analyser plus précisément l'effet d'une différence d'angle d'un autre point de vue, une analyse temporelle en réflexion (*time domain reflectometer* ou *TDR*) est réalisée.

III.5.3.2.b) Analyse temporelle en réflexion des lignes imprimées sur substrat 3D

Une analyse TDR consiste à envoyer une impulsion le long d'une ligne et à analyser la réflexion émise. En effet, si la ligne est adaptée en impédance, le signal ne sera pas réfléchi. En revanche, si la ligne présente des variations d'impédance alors une partie du signal sera réfléchi.

Cette analyse est pertinente dans le cas des lignes imprimées sur substrat 3D car les discontinuités dues aux angles impliquent une variation d'impédance.

Le VNA et la station sous pointes sont utilisés avec un calibrage LRM. Afin d'obtenir une montée du signal rapide et un balayage harmonique, le VNA est calibré sur la bande de fréquences 40 MHz à 26 GHz. Le pitch important des sondes ne permet pas d'avoir un calibrage valide à plus haute fréquence.

Sur la Figure III-40, la réponse lors d'un circuit ouvert est présenté, c'est-à-dire lorsque les pointes de mesure ne sont pas posées. Dans cette situation la totalité du signal est réfléchi c'est pour cela que l'impulsion monte à 1 en réflexion. La montée de la marche est très rapide avec un temps de 6 ps.

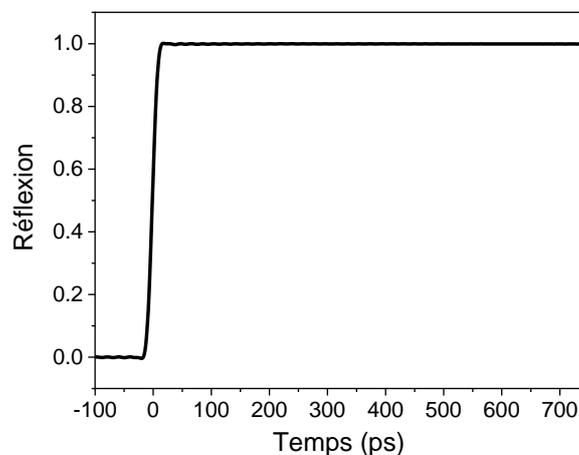


Figure III-40 : Réponse en réflexion suite à l'envoi d'une impulsion en circuit ouvert

Sur la Figure III-41, les résultats de l'analyse TDR pour les lignes coplanaires sur substrat avec angle à 90° et à 130° sont présentés. Le motif imprimé conduit à des réflexions qui ont lieu le long de la ligne. Cela permet d'en déduire les effets des formes 3D.

La largeur du motif mesuré sur l'analyse TDR est la même pour les angles à 90° et à 130° car les lignes sont de mêmes longueurs : de 0 à 650 ps. En connaissant, la vitesse de propagation de l'onde sur la ligne de transmission, il est possible de calculer le temps total de réflexion de l'onde afin de vérifier la cohérence des résultats :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$t = \frac{L}{v}$$

A la suite des mesures, on obtient une valeur de $t=600$ ps, ce qui correspond bien à la largeur des motifs présentés.

Le substrat 3D comporte un angle principal à 90° ou à 130° qui est sortant, mais aussi deux angles secondaires qui sont entrants. Du fait de cette différence, le comportement électromagnétique diffère. L'angle sortant est visible sur l'analyse TDR de l'angle 90° comme un pic tourné vers le haut qui montre un effet inductif à cet endroit. Les angles secondaires entrants, visibles en particulier sur l'angle à 90° , montrent un pic tourné vers le bas qui témoigne d'un effet capacitif. Les pics relatifs à l'angle 130° sont peu visibles lors de l'analyse TDR par comparaison à ceux dus à l'angle 90° car probablement les discontinuités sont moins importantes lorsqu'on se rapproche d'un angle à 180° .

La difficulté de cette analyse est de pouvoir décorréler l'effet électromagnétique lorsque des pistes métalliques subissent un changement de direction dû à des angles et celui dû à une impression de l'encre qui peut être inhomogène dans les angles. En effet, il est également possible que ces comportements soient créés par une variation de largeur de la piste au niveau de ces angles (Figure III-38).

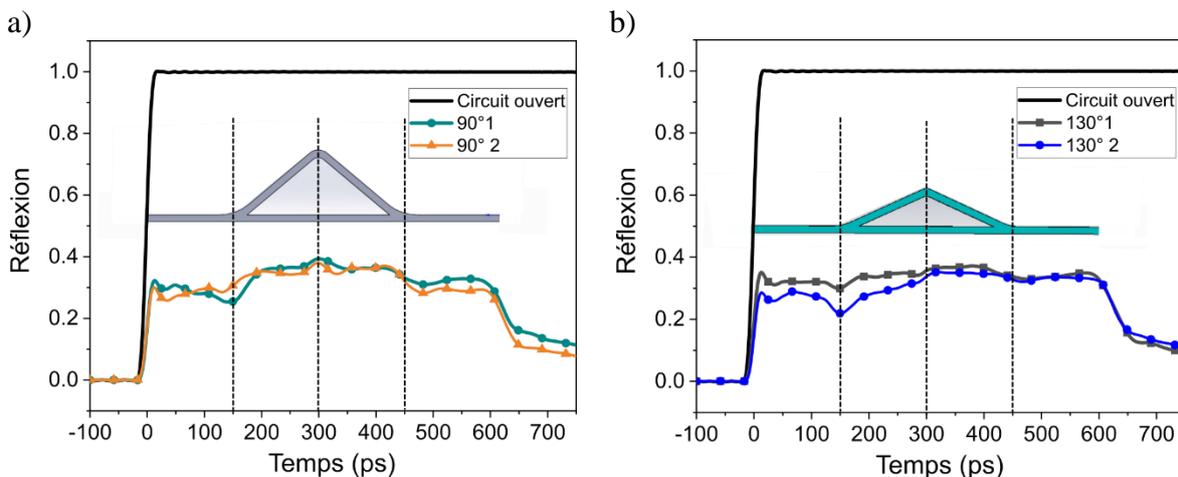


Figure III-41 : TDR des lignes coplanaires en 3D sur substrat avec un angle de a) 90° b) 130°

Cette analyse TDR est une première ébauche pour déterminer des modèles équivalents (une capacité en parallèle, en première approche pour un effet capacitif repéré au niveau de la discontinuité = angle entrant) des discontinuités introduites par des structures 3D sur des lignes de transmission, éléments essentiels pour les concepteurs de dispositifs radiofréquences.

III.6. Exemples d'applications du procédé d'impression

Dans cette partie, trois applications sur des surfaces planes et sphériques sont présentées pour illustrer les possibilités du procédé d'impression par jetting. La première application est une étude sur une antenne LoRa simulée sur un substrat plan. La seconde application est l'intégration d'un tag RFID sur un objet 3D dans le but d'identifier une pièce. La troisième

application est la conception et la réalisation d'un radôme avec un motif imprimé pour une antenne monopole afin de la rendre plus directive.

III.6.1. Applications radiofréquences sur surface plane : antenne LoRa

L'intérêt croissant pour le domaine de l'internet des objets (IoT) implique de développer de nouvelles solutions pour la communication sans fil. Les objets connectés collectent et transmettent des données, généralement pour les analyser et en faire un outil d'aide à la décision. La technologie LoRaWAN est un protocole de communication pour l'IoT qui se veut peu coûteux à implémenter, économe en énergie, bas coût, et destinée à des communications longues portées.

III.6.1.1. Contexte de l'étude

Dans cette partie, une antenne LoRa décrite dans l'article [163] pour des micro-traqueurs est utilisée. Ces dispositifs présentent une antenne WiFi (2,45 GHz), une antenne LoRa (0,868 GHz) et une antenne GPS (1,575 GHz), comme montré sur la Figure III-42.



Figure III-42 : Dispositif de microtraqueurs

L'objectif de cette étude est d'envisager de déporter l'antenne LoRa et GPS sur le boîtier en plastique du micro-traqueur afin de pouvoir miniaturiser l'appareil. Ainsi, l'antenne LoRa / GPS est imprimée avec la technologie jetting sur du FR4 et sur du plastique (PC+ABS). Le but est de comparer les performances de cette antenne fabriquée « classiquement » en cuivre sur du FR4 à celle réalisée par impression sur du FR4 et ensuite sur du plastique. Il sera alors possible de confronter les performances de ces antennes et d'en conclure s'il est possible de réaliser une antenne LoRa en impression sur du plastique. Cette étude a été présentée à la conférence APS-URSI 2019 [120].

III.6.1.2. Matériels et méthodes

Une encre Henkel Electrodag 418 SS à microparticule d'argent (paragraphe II.3.1) de conductivité $2,95 \pm 0,24 \times 10^6$ S/m après recuit de 90°C pendant 30 min ; est utilisée pour la réalisation du dispositif.

Deux substrats sont utilisés dans cette étude :

- Le substrat plastique PC+ABS (paragraphe II.2 et 0) d'épaisseur 0,8 mm avec $\epsilon_r=3,49\pm 0,16$ et $\tan\delta=0,012\pm 0,001$
- Le substrat FR4 d'épaisseur 0,8 mm avec les propriétés suivantes fournies par le constructeur : $\epsilon_r=4,3$ et $\tan\delta=0,021$

Les simulations sont réalisées avec le logiciel CST microwave studio.

III.6.1.3. *Modélisation électromagnétique de l'antenne LoRa*

La structure de l'antenne est reprise dans l'article [163] avec la permission des auteurs. Quatre modélisations sont effectuées :

- L'antenne de référence [163] en cuivre sur FR4 qui résonne aux fréquences 868 GHz et 1572 MHz
- Une antenne de structure identique à l'antenne de référence imprimée en encre argent sur FR4
- Une antenne de structure identique à l'antenne de référence imprimée en encre argent sur le substrat PC+ABS
- Une antenne imprimée avec de l'encre argent sur le substrat PC+ABS avec une structure modifiée de telle sorte que les résonances se situe à 868 GHz et 1572 MHz

Les modules des paramètres S11 sont présentés sur la Figure III-43. Les paramètres S11 de l'antenne originale et de l'antenne imprimée en encre argent sur du FR4 présentent assez peu de différences. En effet, la différence entre ces deux dispositifs est principalement causée par la conductivité du matériau : 59×10^6 S/m pour le cuivre et $2,95 \pm 0,24 \times 10^6$ S/m pour l'encre argent.

Les résonances de l'antenne imprimée en encre argent simulée sur du PC+ABS présentent un décalage par rapport à celles sur FR4 probablement causé par la différence de propriétés électromagnétiques des substrats. Il est cependant possible de positionner à nouveau les résonances à 868 GHz et 1572 MHz, en modifiant les dimensions de la structure de l'antenne, c'est ce qui est montré avec la version « améliorée ».

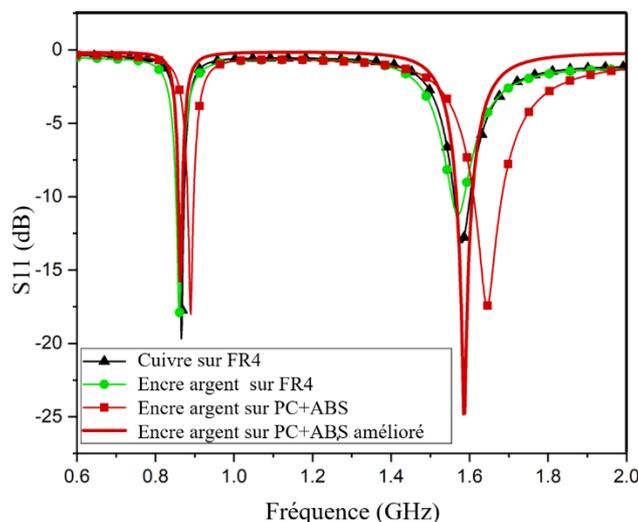


Figure III-43 : Simulation de l'antenne LoRa-paramètre S_{11} en fonction de la fréquence

Dans le Tableau 54, les résultats simulés du gain réalisé et de la bande passante obtenus sont reportés. Le gain réalisé de -6,5 dB pour l'antenne imprimée sur le substrat plastique PC+ABS est moins important que celui pour l'antenne originale de -4 dB à la fréquence 0,868 MHz. En revanche, il présente un gain légèrement meilleur pour la fréquence 1575 MHz : -0,6 dB pour l'antenne imprimée et -1,2 dB pour l'antenne de référence. Ces valeurs de gain sont acceptables pour des applications IoT.

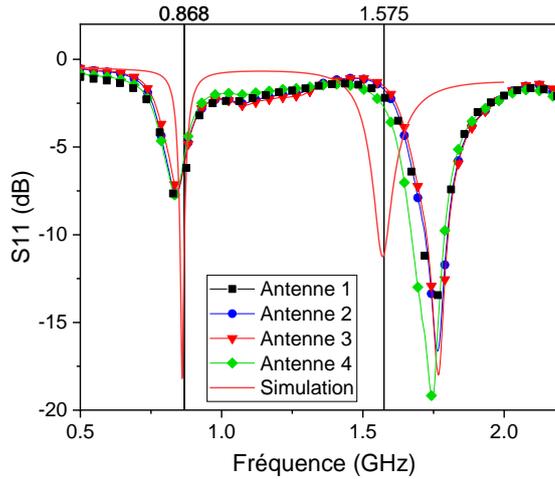
Tableau 54 : Comparaison des simulations de gain et de bande passante pour l'antenne de référence et de l'antenne imprimée sur du PC+ABS

	Gain réalisé (dB)	
	<i>Antenne améliorée imprimée sur PC+ABS</i>	<i>Antenne de référence en cuivre sur FR4</i>
868 MHz	-6,5	-4
1575 MHz	-0,6	-1,2

III.6.1.4. Mesure du paramètre S des antennes imprimées

Le paramètre S_{11} des antennes imprimées est mesuré afin de vérifier les fréquences de résonance des antennes. Sur la Figure III-44, les mesures du paramètre S_{11} sont montrés pour des antennes imprimées sur du FR4. Un léger décalage de 30 MHz est visible pour la fréquence 0,868 GHz et un décalage plus important de 200 MHz pour la fréquence 1,575 GHz.

a)



b)

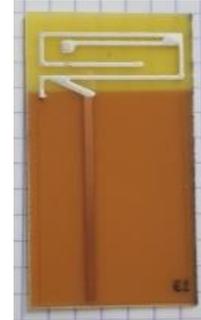
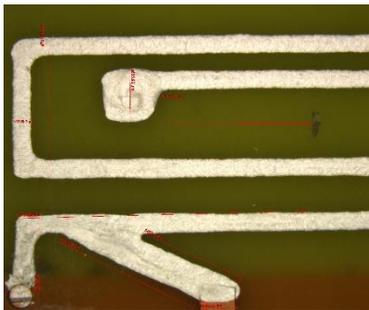


Figure III-44 : a) Mesure du paramètre S_{11} sur 4 antennes imprimées sur du FR4 et simulation b) Photographie d'une antenne imprimée sur FR4

Ces décalages peuvent s'expliquer par des défauts d'impression, montrés sur la Figure III-45. En effet, le procédé d'impression a été développé pour des substrats plastiques, ainsi les impressions réalisées ont moins de précision.

a)



b)

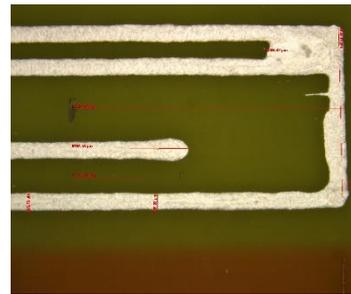


Figure III-45 : Photographie à la binoculaire de l'antenne imprimée sur du FR4 a) Partie gauche b) Partie droite

Sur la Figure III-46, des antennes sur plastique PC+ABS sont imprimées et mesurées. Ces antennes présentent une résonance à la fréquence 0,868 GHz, cependant un décalage de 150 MHz est visible pour la fréquence 1,575 GHz, un ajustement de dimensions sera alors nécessaire afin d'obtenir une résonance à cette fréquence.

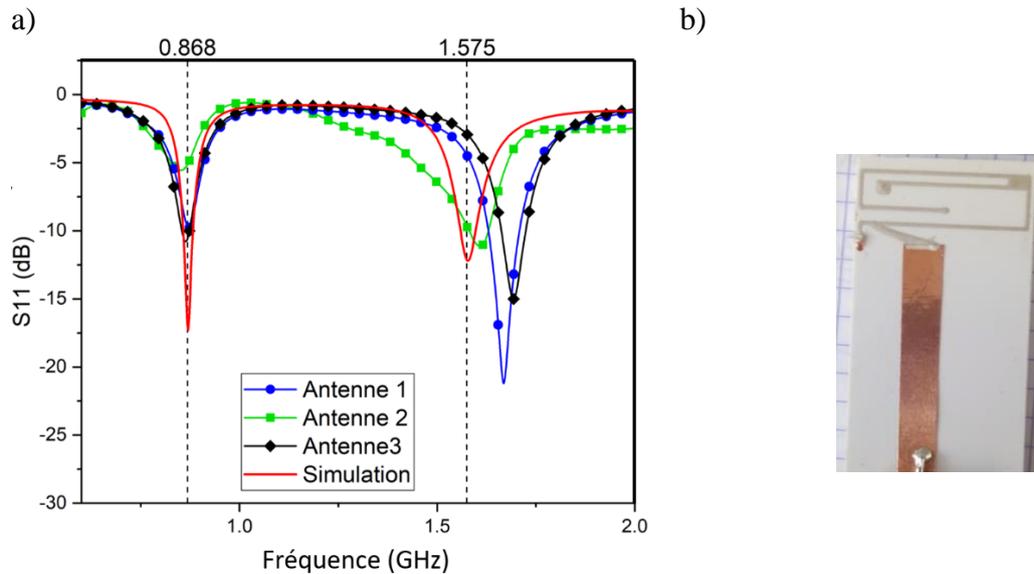


Figure III-46 : a) Mesure du paramètre S_{11} sur 3 antennes imprimées sur du plastique PC+ABS et simulation b) Photographie d'une antenne imprimée sur du plastique PC+ABS

En simulation, il semble possible de déporter l'antenne LoRa et GPS sur la coque en plastique avec des performances qui restent acceptables pour de l'IoT. Les mesures montrent qu'il est possible d'obtenir des résonances aux fréquences visées avec un ajustement de dimensions pour la fréquence 1,575 GHz. Pour aller plus loin dans cette étude, il faudrait imprimer l'antenne sur la coque directement et réaliser les mesures afin de confirmer les simulations.

III.6.2. Applications radiofréquences sur surface complexe

III.6.2.1. Réalisation d'un tag RFID

L'intégration d'électronique sur des pièces plastiques est devenue particulièrement intéressante industriellement pour l'identification des pièces au cours du processus de montage mais aussi pendant la durée de vie des objets. Dans cette étude, un dispositif de traçage (tag), basé sur la technologie RFID (860 MHz à 960 MHz), est réalisé sur une pièce industrielle pour laquelle la zone d'accès pour l'impression peut être difficile.

III.6.2.1.a) Matériels et méthodes

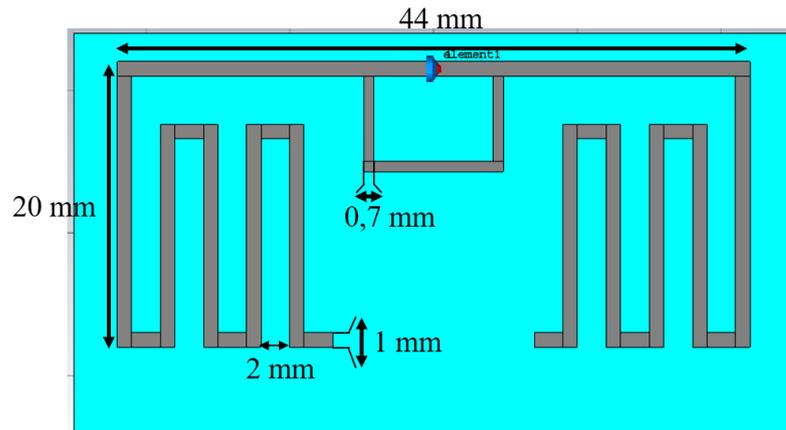
L'impression est réalisée sur une pièce plastique industrielle, elle présente les propriétés électromagnétiques suivantes : $\epsilon_r=3,3$ et $\tan\delta=0,018$ à 900 MHz. Celles-ci ont été mesurées par la méthode des cavités.

L'impression est réalisée avec le robot 6-axes Stäubli. L'encre Electrodag 418SS présentée précédemment est utilisée.

III.6.2.1.b) Résultats de modélisation et mesures

Le modèle du tag RFID et sa simulation sont présentés sur la Figure III-47. Le résultat de la simulation du modèle montre une adaptation à 0,87 GHz pour -16 dB.

a)



b)

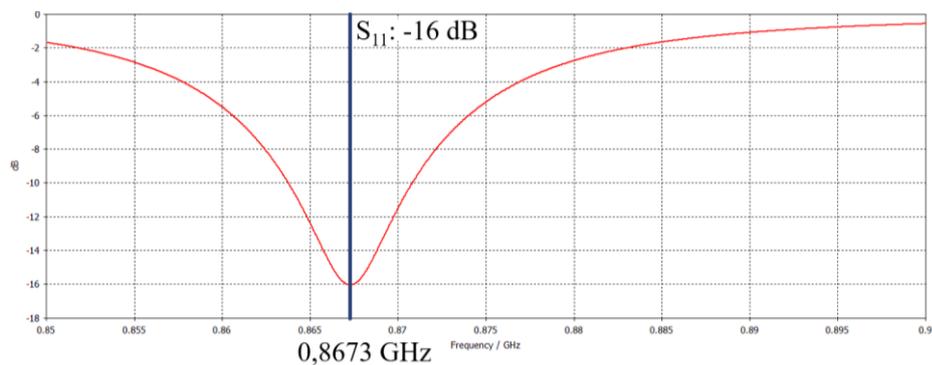


Figure III-47 : a) Modèle du tag RFID b) Paramètre S_{11} simulé du tag RFID

Sur la Figure III-48, la réalisation du tag RFID sur une pièce industrielle (goulotte pour automobile) est présentée. Une puce NXP Ucode 8 ($460 \mu\text{m} \times 460 \mu\text{m}$) est choisie afin de pouvoir effectuer la lecture du tag. La distance de lecture mesurée est de 130 à 140 cm.

a)



b)



Figure III-48 : a) Tag RFID imprimé sur une pièce industrielle b) Pièce avec tags RFID imprimés en position d'impression

Sur les pièces plastiques des annotations en reliefs sont présentes à la surface de celles-ci. Avec la technologie jetting, il est possible d'imprimer par-dessus ces reliefs, cependant cela crée des défauts d'impression montrés sur la Figure III-49. Pour aller plus loin dans cette

analyse, il faudrait comparer les paramètres S et la distance de lecture pour des tags avec des impressions sur les annotations et sans.

Un profil est réalisé avant la discontinuité créée par les annotations afin de vérifier les dimensions du tag. Une largeur moyenne de pistes de $1,1 \pm 0,1$ mm et un écartement moyen entre les pistes de $1,8 \pm 0,1$ mm sont obtenus. Une déviation de 0,1 mm pour l'écartement est observée par rapport aux dimensions prévues par la modélisation (Figure III-48), ce qui est assez minime pour un tag RFID.

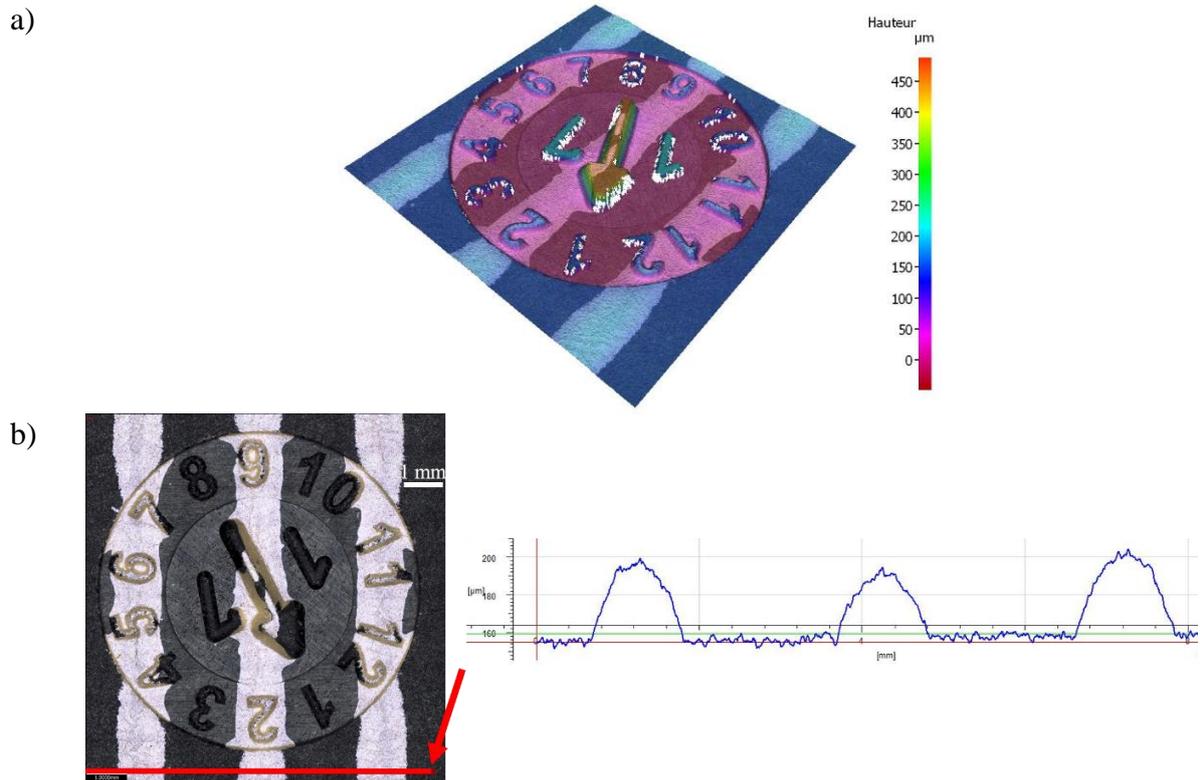


Figure III-49 : a) Topographie de l'impression du tag RFID sur les annotations en relief de la pièce plastique b) Profil réalisé avant les annotations

III.6.2.2. Réalisation d'un radôme imprimé

III.6.2.2.a) Contexte de l'étude

Un radôme – contraction de radar et dôme - a pour rôle de protéger les antennes contre l'environnement (pluie, vent, neige...) mais aussi des regards pour ne pas divulguer l'orientation de l'antenne (dans le cas d'écoutes par exemple). Les radômes sont, par exemple, utilisés pour protéger de la foudre les antennes des avions. [164]. Ils peuvent également être utilisés pour modifier ou améliorer les propriétés de l'antenne. Dans ce cas, il convient d'ajouter un motif métallique sur la surface du radôme. Différentes techniques sont utilisées pour cela dans la littérature comme le masque 3D [165], la gravure [166] ou l'origami [167]. Dans cette étude, un motif est ajouté au radôme par le procédé d'impression de jetting.

L'objectif de cette étude est de montrer la possibilité de réaliser un radôme permettant d'améliorer la directivité d'une antenne monopôle 5G à l'aide du procédé d'impression de jetting. Cette étude a été acceptée pour la conférence APS URSI 2021 [168].

Le dispositif présenté dans cette partie reprendra donc les différents éléments qui composent un système de radôme : une antenne émettrice dont la directivité sera choisie et caractérisée, un dôme plastique recouvrant cette antenne et qui sera muni de différents motifs imprimés agissant sur la directivité de l'antenne vue de l'extérieur.

III.6.2.2.b) Réalisation de l'antenne monopôle 5G

Dans cette partie, l'antenne qui sera recouverte par le radôme est réalisée. Dans un premier temps une modélisation est effectuée sur CST microwave studio puis l'antenne est fabriquée et mesurée.

Pour faciliter l'évaluation de l'effet du radôme sur les propriétés de l'antenne, une antenne omnidirectionnelle est favorisée. Une structure patch en anneau est sélectionnée car elle est simple à réaliser et présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel. L'antenne est réalisée pour résonner à 3,6 GHz. Le substrat utilisé est le Roger 4003C ($\epsilon_r=3,55$) avec une épaisseur de 1,524 mm. La géométrie de l'antenne est décrite en Figure III-50.

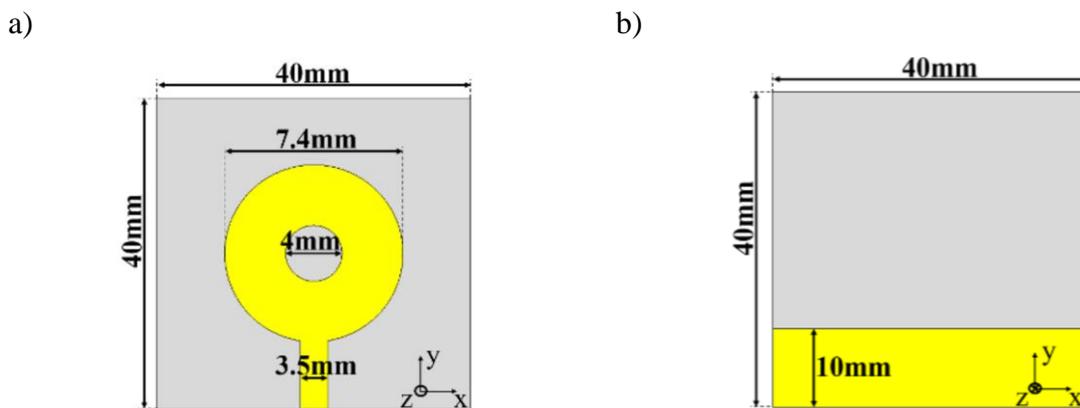


Figure III-50 : Géométrie de l'antenne a) recto b) verso

La comparaison des mesures avec la simulation est présentée sur la Figure III-51. La simulation et la mesure présentent une légère différence qui peut s'expliquer par l'influence de l'environnement (système de fixation au mât pour la mesure) lors de la mesure car l'antenne monopole y est particulièrement sensible. L'antenne présente une résonance à 3,6 GHz comme souhaité.

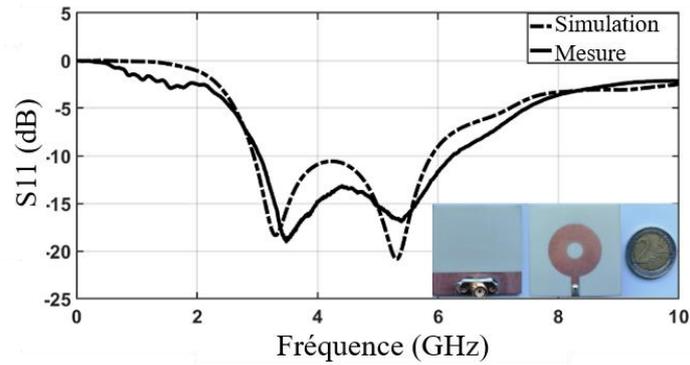


Figure III-51 : Paramètre S11 mesuré et simulé de l'antenne monopôle

III.6.2.2.c) Réalisation du radôme

L'impression est réalisée sur une demi-sphère en acrylique de 100 mm de diamètre. Le radôme présente les propriétés électromagnétiques suivantes : $\epsilon_r=5,1$ et $\tan\delta=0,14$ à 3,6 GHz. Celles-ci ont été mesurées par la méthode des sondes [169].

L'impression est réalisée avec le robot 6-axes Stäubli qui permet d'imprimer sur une demi-sphère. L'encre Electrotag 418SS présentée précédemment est utilisée.

La Figure III-52 montre la structure du radôme modélisé. Lors de l'ajout du radôme sans motif, le gain maximum de l'antenne est réduit de 2,39 dBi à 2,36 dBi. Le but de cette étude est de modifier ce radôme afin d'améliorer la directivité de l'antenne ainsi que protéger l'antenne de l'environnement. Plus spécifiquement, le radôme imprimé doit agir comme une lentille afin de transformer une antenne omnidirectionnelle en antenne directionnelle avec un meilleur gain. Pour réaliser cela, un motif circulaire de 0,7 mm est ajouté sur la surface du radôme. Ce motif agit comme un réflecteur, ce qui permet de réfléchir le lobe secondaire afin d'améliorer le lobe principal. L'antenne devient alors plus directionnelle. Ce principe se base sur le réflecteur à deux éléments des antennes Yagi [170].

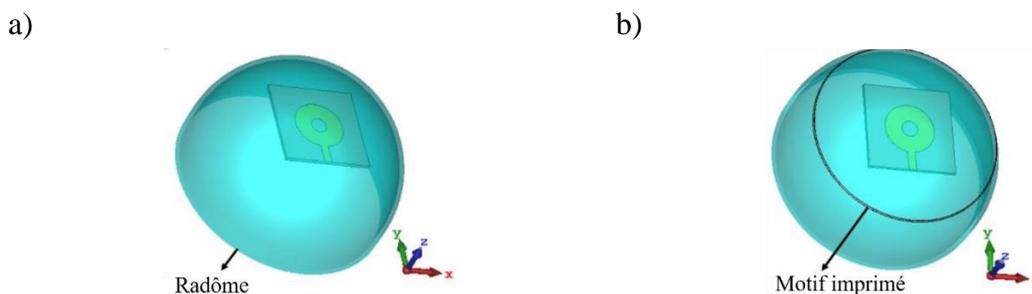
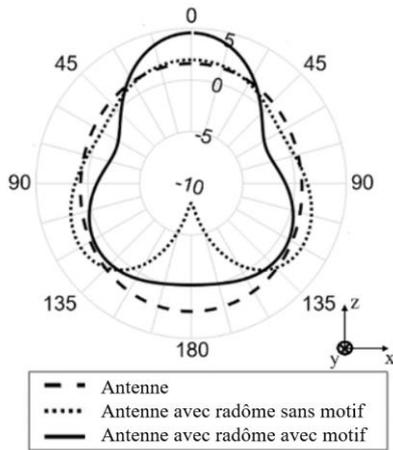


Figure III-52 : a) Antenne recouverte du radôme ne comportant pas le motif b) Antenne recouverte du radôme comportant le motif

Le diagramme de rayonnement simulé est présenté sur la Figure III-53. On peut observer une modification du diagramme de rayonnement et une amélioration du gain de 2 dBi dans une direction.

a)



b)

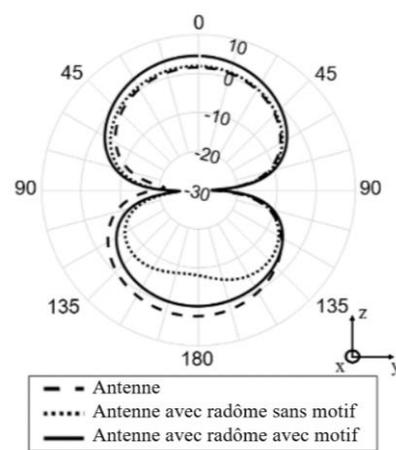


Figure III-53 : a) Diagramme de rayonnement simulé dans le plan E à 3,6 GHz b) Diagramme de rayonnement simulé dans le plan H à 3,6 GHz

Le motif est imprimé sur le radôme et l'antenne équipée du radôme avec motif est mesurée en chambre anéchoïde comme montré en Figure III-54.

a)



b)

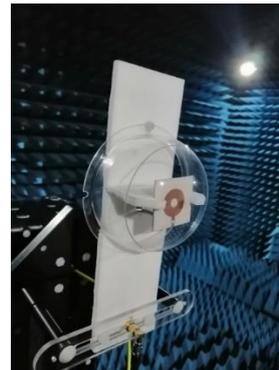
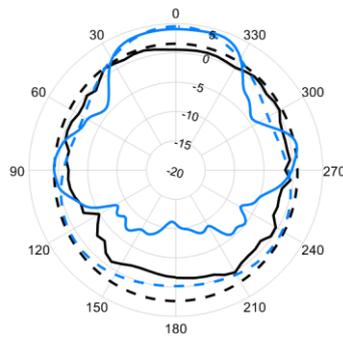


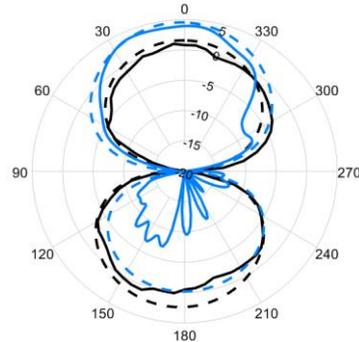
Figure III-54 : a) Radôme avec motif circulaire imprimé avec le robot 6 axes b) Montage réalisé en chambre anéchoïde

La Figure III-55 montre les résultats des mesures de l'antenne avec et sans radôme. Un bon accord entre simulation et mesure est observé, à part pour la partie arrière du diagramme. Cela est causé par le montage (Figure III-54) qui perturbe la mesure. L'amélioration de la directivité et du gain de 2 dBi est visible sur le diagramme de rayonnement mesuré et confirme la simulation.

a)



b)



- Simulation-sans radôme imprimé
- Mesure-sans radôme imprimé
- Simulation-avec radôme imprimé
- Mesure-avec radôme imprimé

Figure III-55 : a) Mesure et simulation du diagramme de rayonnement avec et sans radôme à 3,6 GHz dans le plan H b) Mesure et simulation du diagramme de rayonnement avec et sans radôme à 3,6 GHz dans le plan E

Ces résultats prometteurs montrent donc l'effet d'un radôme sur lequel un motif simple est imprimé en 3D : l'antenne monopôle placée sous le radôme est ainsi rendue directionnelle avec une amélioration du gain.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, l'objectif était de déterminer les performances de dispositifs RF imprimés en technologie jetting. Dans un premier temps, des lignes coplanaires en 2D ont été réalisées, les paramètres S de ces lignes ont été mesurés et ont montré une transmission du signal. Une extraction a été réalisée du coefficient d'atténuation, de la constante de phase, de l'impédance et de la vitesse de phase.

Les lignes de transmission coplanaires présentent de faibles pertes (inférieures à 1 dB/mm) et sont non dispersives. L'impédance selon la méthode LH montre une impédance de 50 Ω sur une des mesures réalisées, ce qui montre également une précision suffisante du procédé pour l'impression de lignes coplanaires 50 Ω .

La comparaison entre les lignes de transmission coplanaires imprimées et les lignes de transmission coplanaires en cuivre montre que les lignes coplanaires imprimées présentent une atténuation plus forte en moyenne de 7 ± 3 fois.

Une alternative des lignes coplanaires en maillant les plans de masse est proposée afin d'économiser du temps d'impression et de l'encre. Les lignes coplanaires maillées transmettent correctement le signal jusqu'à 15 GHz et les résultats sont répétables.

Afin de réaliser des dispositifs sur des substrats 3D, des substrats plastiques positionnés horizontalement et avec une inclinaison ont été imprimés. Les paramètres S mesurés sur les lignes de transmission coplanaires imprimées horizontalement et avec une inclinaison sont similaires.

Des lignes coplanaires ont ensuite été imprimées sur des substrats 3D comportant des angles soit à 90° , soit à 130° . Les lignes ont été mesurées grâce aux ailettes du substrat. Les paramètres S sont similaires pour les angles à 90° et à 130° . Le procédé est répétable sur substrat 3D. Une analyse TDR a été menée afin de rendre compte de l'effet 3D du substrat. Un effet inductif a été mis en évidence pour l'angle sortant principal et un effet capacitif pour les angles entrants. Cette analyse peut ouvrir la voie à une modélisation plus précise comme cela existe pour des lignes de transmission en coin par exemple.

Dans une dernière partie, plusieurs applications réalisées par le procédé d'impression jetting ont été décrites. Celles-ci ont été réalisées sur des substrats 2D et 3D. Une antenne dual bande LoRa (0,868 GHz) et GPS (1,575 GHz) a été simulée en cuivre sur FR4, puis en cuivre sur thermoplastique et enfin imprimée avec de l'encre argent sur thermoplastique. Il est alors possible en modifiant les dimensions de l'antenne d'obtenir les résonances aux fréquences 0,868 GHz et 1,575 GHz malgré les modifications de matériaux. Le gain est également réduit mais reste acceptable pour des applications IoT. Un tag RFID a été imprimé sur une pièce industrielle afin de pouvoir l'identifier aisément. Et enfin, un radôme imprimé a été réalisé afin de rendre une antenne monopôle plus directive et d'augmenter son gain de 2 dBi.

Conclusion générale

Les technologies plastroniques sont en plein essor avec l'augmentation du nombre d'objets connectés. Elles permettent de s'affranchir du PCB et d'ajouter des fonctions intelligentes à des objets existants. Dans le cadre de ce travail, l'objectif était de concevoir des dispositifs plastroniques 3D avec une technologie de rupture par rapport à des technologies maîtrisées telles que le LDS ou l'électronique moulée qui sont coûteuses et moins versatiles.

Pour concevoir ces objets ayant des fonctionnalités de communication sans fils, sur des gammes de fréquences diverses, une technologie d'impression robotisée a été développée selon un cahier des charges fixé par des contraintes industrielles :

- Utilisation de procédés industriels
- Utilisation de matériaux qualifiés
- Utilisation de produits commercialisés

Ce cahier des charges a été fixé avec l'ambition de pouvoir développer des procédés industriels à moyen terme. La formulation des supports ou des encres fonctionnelles n'était donc pas dans l'objectif du travail.

Dans l'optique du développement de ces objets fonctionnalisés par impression directe, les différentes étapes du travail de thèse ont consisté à :

- Mettre en œuvre le procédé de jetting, le caractériser et l'optimiser
- Evaluer les performances radiofréquences atteignable avec le procédé jetting. Cela a pour but d'identifier les possibilités et les limites en termes d'applications.
- Réaliser des démonstrateurs sur substrat 2D et 3D avec le procédé de jetting

En premier lieu, il s'agissait de définir les paramètres du système d'impression afin d'obtenir des gouttes d'encre régulières. Avec une combinaison de paramètres optimisés, les caractéristiques suivantes ont été obtenues pour l'impression :

- D'une goutte seule : une largeur de $665 \pm 20 \mu\text{m}$, une longueur de $649 \pm 22 \mu\text{m}$ et une épaisseur de $34 \pm 4 \mu\text{m}$
- D'une ligne simple, c'est-à-dire formée d'une série de gouttes superposées dans le sens longitudinal - dans ce cas, il est préférable d'utiliser un recouvrement à 50% : la largeur est de $689 \pm 27 \mu\text{m}$ et l'épaisseur de 25 ± 2
- D'une ligne formée de plusieurs lignes superposées - dans ce cas, il est recommandé d'utiliser des recouvrements longitudinaux et latéraux compris entre 50% et 70% afin d'éviter une accumulation de matière trop importante qui augmente la rugosité : pour un recouvrement latéral et longitudinal de 50%, la ligne obtenue a une largeur de $973 \pm 16 \mu\text{m}$ et une épaisseur de $39 \pm 2 \mu\text{m}$. La conductivité de ces lignes est mesurée à $2,9 \pm 0,2 \times 10^6 \mu\text{m}$ soit 20 fois inférieure à celle du cuivre ($59 \times 10^6 \text{ S/m}$). Cette conductivité est tout de même suffisante pour les applications visées.

Des stratégies pour améliorer les impressions ont été mises en place pour améliorer nettement la qualité d'impression. Le début et la fin des lignes imprimées peuvent être améliorées en commençant l'éjection des gouttes et en arrêtant cette éjection lorsque le système d'impression a atteint une vitesse d'impression constante. Lorsque les lignes imprimées comportent un changement de direction marqué – angle -, un surplus de matière apparaît à cet endroit. Il peut être minimisé en choisissant un lissage minimal des trajectoires du robot. En utilisant un lissage de 0,1, il est possible de réduire l'écart entre la partie rectiligne de la ligne et la partie angulaire de la ligne à 25%. Pour l'impression des aplats, une stratégie basée sur les techniques utilisées par les imprimantes 3D est utilisée : l'impression en zigzag. Celle-ci est adaptée afin d'éviter les angles droits, ce qui permet de minimiser les discontinuités de vitesse. Un contour est ajouté ensuite à l'aplat afin d'éviter des ondulations sur les bords.

Ces caractéristiques montrent que la technologie jetting n'atteint pas les performances du PCB en termes de conductivité, taille de piste ou écartement entre les pistes cependant cela est suffisant pour les applications visées. En effet, il est possible de faire des circuits électroniques en utilisant des composants montés en surface et cette résolution est également suffisante pour des applications radiofréquences.

En comparaison avec un procédé particulièrement utilisé dans l'électronique imprimée, la sérigraphie, le jetting n'atteint pas ces résolutions mais permet une plus grande flexibilité d'impression car il n'y a pas besoin de masques et permet également l'impression sur des substrats de formes 3D.

La détermination des dimensions des lignes imprimées et les stratégies mises en place pour améliorer les impressions permettent, alors de modéliser des dispositifs radiofréquences.

Afin de réaliser un dispositif de test pour évaluer les grandeurs qui caractérisent la transmission du signal au travers d'un motif imprimé, les lignes de transmission coplanaires sont choisies car elles sont adaptées pour étudier l'utilisation du procédé dans le domaine radiofréquence. Au-delà des mesures des paramètres S, le coefficient d'atténuation, la constante de phase, l'impédance et les paramètres RLGC sont extraits par deux méthodes différentes : la méthode de Mangan et la méthode LH.

Les lignes de transmission coplanaires présentent de faibles pertes (inférieures à 1 dB/mm) et sont non dispersives. La méthode LH calcule une impédance de 50 Ω sur une des mesures réalisées, ce qui montre également une précision suffisante du procédé pour l'impression de lignes coplanaires 50 Ω . La comparaison entre les lignes coplanaires imprimées et les lignes coplanaires en cuivre montrent que les lignes coplanaires imprimées présentent une atténuation plus forte en moyenne de 7 ± 3 fois sur la gamme de fréquence de 0 à 8 GHz. Cela permet tout de même de réaliser des dispositifs radiofréquences sur cette gamme de fréquence.

Une alternative des lignes coplanaires en maillant les plans de masse est proposée afin d'économiser du temps d'impression et de l'encre. Les lignes coplanaires maillées transmettent correctement le signal jusqu'à 15 GHz et les résultats sont répétables.

Afin de réaliser des dispositifs sur des substrats 3D, une étude a porté sur la détermination des paramètres S sur des lignes coplanaires imprimées à plat et sur les surfaces inclinées. Il a été montré que les paramètres S sont similaires pour des lignes de transmission coplanaires imprimées sur des substrats plastiques horizontaux et inclinés.

Afin d'aller vers des règles de conception et de modélisation pour la plastronique, des lignes de transmission coplanaires ont été imprimées sur des substrats 3D comportant des angles sortants (sommets) à 90° et à 130° . Le procédé est répétable sur substrat 3D. Une analyse TDR a été menée afin de rendre compte de l'effet 3D du substrat. Un effet inductif a été mis en évidence pour l'angle sortant et un effet capacitif pour les angles entrants. Cette analyse peut ouvrir la voie à une modélisation plus précise comme cela existe pour des lignes de transmission en coin par exemple. Avec une modélisation, il sera alors possible de réaliser des modèles prédictifs précis des comportements de dispositifs plastroniques RF, ce qui serait une avancée vers une industrialisation du procédé.

Plusieurs applications radiofréquences réalisées par le procédé d'impression jetting ont été décrites pour les domaines de l'IoT, la smart industrie et de l'automobile. Celles-ci sont réalisées sur des substrats en 2D et en 3D. Une antenne dual bande LoRa (0,868 GHz) et GPS (1,575 GHz) d'un micro-traqueur, a été simulée en cuivre sur FR4, puis en cuivre sur thermoplastique et enfin imprimée avec de l'encre argent sur thermoplastique. Il est alors possible en modifiant les dimensions de l'antenne d'obtenir les résonances aux fréquences 0,868 GHz et 1,575 GHz malgré les modifications de matériaux. Le gain est également réduit mais reste acceptable pour des applications IoT. Cette étude montre alors qu'il est possible d'intégrer l'antenne LoRa directement sur le boîtier en plastique et ainsi de miniaturiser le micro-traqueur.

Un tag RFID a été imprimé sur une pièce industrielle d'automobile afin de pouvoir l'identifier aisément. Les mesures montrent une lecture possible à une distance de 130 à 140 cm. Cela donne une alternative à l'étiquetage des pièces pour leur identification, plus fiable en intégrant directement les informations à la pièce.

Un radôme imprimé a été réalisé afin de rendre une antenne monopôle 5G plus directive et d'augmenter son gain de 2 dBi. Ainsi, il est possible de produire une antenne tout en ayant la possibilité de modifier ces caractéristiques pour répondre au mieux aux besoins du client.

Cette étude a mis en avant des problématiques autour de la plastronique : la mesure radiofréquence et les connexions. En effet, sur des pistes imprimées il n'est pas possible de souder à l'étain un composant, ce qui rend les connexions et les mesures compliquées. Il est en revanche possible de réaliser des soudures à froid en déposant de l'encre argent afin de faire la connexion avec le composant, il faut ensuite recuire le dispositif pour réaliser la soudure. Une colle peut également être utilisée afin de maintenir le composant et d'améliorer la robustesse du circuit. Dans cette étude, une station sous pointes a été utilisée pour la mesure, ce qui permet de s'affranchir des connecteurs SMA. La station sous pointes présente cependant des limites car les pointes doivent être posées à plat ce qui peut être difficile à réaliser lors de l'impression sur surface 3D (cylindre par exemple). Cela pose donc la question du développement d'outils de mesures spécifiques pour la caractérisation en 3D.

La technique d'impression jetting présente des avantages qui ont été mis en évidence au cours de ce travail. Elle permet une facilité de mise en œuvre comparée aux autres procédés plastroniques tels que le LDS ou l'électronique moulée. Cette technique comporte peu d'étapes et est rapide. Elle s'adapte rapidement à toute nouvelle surface 3D ou à un nouveau motif. Il a été montré que cette technique peut être utilisée pour des applications radiofréquences telles que des antennes 5G. Mais ces différentes technologies ne sont pas réellement en concurrence car elles adressent des marchés différents, notamment du fait des résolutions atteintes et des coûts associés à chaque procédé.

Pour aller plus loin, avec la technologie d'impression directe développée plusieurs perspectives sont envisagées. Tout d'abord, des évolutions du procédé sont possibles afin de mieux adapter ses performances au milieu industriel. L'étape du recuit nécessite un approfondissement pour réduire sa durée (actuellement 30 min) et améliorer la conductivité de la piste. Il serait envisageable d'utiliser un recuit NIR, pour cela le mouvement du laser serait synchronisé avec l'impression d'encre afin de recuire la piste en temps réel sans perte de temps. L'utilisation d'un logiciel de programmation industrielle et une caméra afin de détecter la position des pièces permettraient également un gain de temps pour la réalisation de la trajectoire d'impression. Un travail sur la formulation d'encres ayant des propriétés plus adaptées à la technique d'impression et aux substrats pourrait améliorer la résolution des impressions. L'inconvénient majeure de la tête d'impression Vermes est son encombrement, cela est un verrou pour l'impression dans certains volumes, une autre tête d'impression jetting moins encombrante pourrait être envisagée. Enfin, il pourrait également être possible de monter plusieurs têtes d'impression sur le robot avec un adaptateur adéquat afin de pouvoir utiliser la technique d'impression la plus adaptée au substrat à imprimer.

Dans ce travail, l'analyse des paramètres RLGC qui a été effectuée ouvre des perspectives de modélisation. Plusieurs difficultés ont été rencontrées telles que les mesures sur des dispositifs de grande taille en comparaison avec des dispositifs « classiques » de RF. Une modélisation des dispositifs permettrait de réaliser des analyses prédictives précises de dispositifs radiofréquences réalisés avec la technologie plastronique d'impression directe développée dans cette thèse.

Les possibilités d'applications sont vastes : la récupération d'énergie pourrait être un domaine particulièrement intéressant pour le jetting. Avec cette technologie d'impression directe, il serait possible de réaliser des rectennas sur diverses surfaces d'objets 3D et d'intégrer des capteurs autonomes sans batterie.

La Chaire MINT a permis le développement de cette nouvelle technologie et l'ouverture vers un vaste champ d'applications novatrices. Il y a 6 ans, la technologie additive pour la plastronique était à ses débuts. Aujourd'hui un procédé a été développé et plusieurs têtes d'impressions ont été investiguées afin de déterminer leurs limites et leurs avantages. Les champs d'applications sont nombreux, tels que l'automobile, l'aéronautique, l'IoT ou la domotique. Il n'y a pas de réelle concurrence entre la technologie développée dans ce travail et les technologies existantes chacune ayant ses limitations et ses avantages qui sont à mettre au regard de l'application ciblée.

Annexes

Annexe A : Méthode générale de caractérisation par les ondes : les paramètres S

La méthode de caractérisation par les ondes permet de caractériser jusqu'à des quadripôles. Le dispositif est considéré comme une « boîte noire » qui est examinée uniquement par les ondes qui entrent et sortent de celui-ci. Cela permet alors de le caractériser en réflexion et en transmission.

1. Les paramètres S

Le quadripôle est représenté en Figure 0-1. P_1 et P_2 sont les ports du quadripôle. A_1 et A_2 sont des ondes entrantes et B_1 et B_2 les ondes sortantes du quadripôle. Dans le cas d'un dipôle A_2 et B_2 seraient nuls.

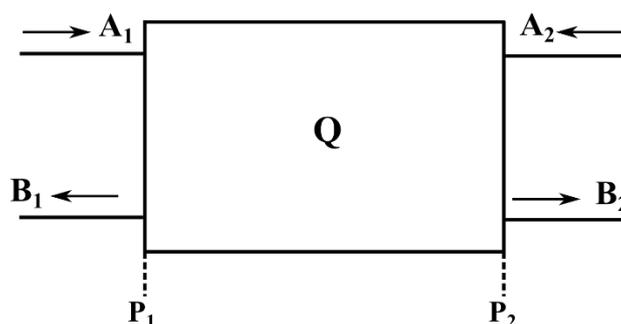


Figure 0-1 : Ondes entrantes et sortantes d'un quadripôle

\underline{A} et \underline{B} sont les amplitudes complexes des ondes, respectivement, entrantes et sortantes. Elles s'expriment de la façon suivante :

$$\underline{B}_1 = \underline{s}_{11} \underline{A}_1 + \underline{s}_{12} \underline{A}_2 \quad (0.1)$$

$$\underline{B}_2 = \underline{s}_{21} \underline{A}_1 + \underline{s}_{22} \underline{A}_2 \quad (0.2)$$

Soit sous forme de matrice :

$$\begin{bmatrix} \underline{B}_1 \\ \underline{B}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{s}_{11} & \underline{s}_{12} \\ \underline{s}_{21} & \underline{s}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{A}_1 \\ \underline{A}_2 \end{bmatrix} \quad (0.3)$$

Les s_{ij} ou paramètres S (*Scattering*) caractérisent le dipôle en transmission et en réflexion quadripôle. Les paramètres S sont exprimés en dB.

2. Matrice ABCD

Il est aussi possible de qualifier le quadripôle en termes de courant et tension. Le quadripôle est alors représenté en Figure 0-2.

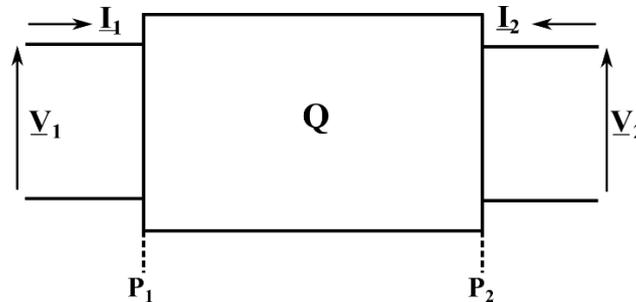


Figure 0-2 : Quadripôle courant et tension entrants et sortants

La matrice d'impédance (matrice Z) permet d'exprimer les tensions en fonction des impédances :

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{11} & \underline{z}_{12} \\ \underline{z}_{21} & \underline{z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} \quad (0.4)$$

La matrice admittance (matrice Y) permet d'exprimer les intensités en fonction des tensions :

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{11} & \underline{y}_{12} \\ \underline{y}_{21} & \underline{y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \end{bmatrix} \quad (0.5)$$

La matrice de chaîne des tensions et courants (matrice ABCD) permet d'exprimer la tension et intensité d'un accès en fonction d'un autre.

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_2 \\ -\underline{I}_2 \end{bmatrix} \quad (0.6)$$

Il est possible de lier toutes ces matrices entre elles selon les paramètres souhaités. La matrice ABCD permet de calculer la matrice d'un circuit en cascade.

Annexe B : Définitions et caractéristiques des antennes

Une antenne est un dispositif rayonnant permettant de recevoir ou d'émettre des ondes (*IEEE standard definitions of terms for antennas*). Les antennes sont utilisées à des fréquences particulières selon l'utilisation visée, quelques exemples de fréquences sont indiqués dans Tableau 55.

Tableau 55 : Exemples de quelques fréquences associées à leurs applications

Fréquences (GHz)	0,470-783	0,9-1,8	1,563-1,587	2,4-2,483	3,4-3,8
Applications	Télévision TNT	GSM	GPS	Wifi	5G

1. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est une fonction mathématique représentant les propriétés de radiation de l'antenne en fonction des coordonnées spatiales. Les coordonnées spatiales sont définies comme montré sur la Figure 0-3 par deux angles (θ, ϕ) et un rayon r .

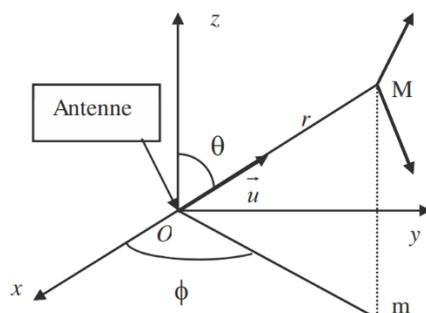


Figure 0-3 : Système de coordonnées pour analyse d'antenne

Le diagramme de rayonnement peut être tracé en 2 ou 3 dimensions. Pour plus de clarté il est souvent représenté en 2D avec un seul angle variant.

2. Directivité d'une antenne

La directivité D (en dB) d'une antenne est définie comme le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction (θ, ϕ) et la puissance rayonnée par l'antenne isotrope équivalente (soit la puissance moyenne dans toutes les directions).

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_r}{4\pi}} \quad (0.7)$$

Avec

- $P(\theta, \phi)$ la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction (θ, ϕ) en W/stéradian

- P_r la puissance totale rayonnée en W, définie par l'équation suivante :

$$P_r = \int_0^{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega \quad (0.8)$$

La directivité est principalement calculée pour la direction de rayonnement maximal.

3. Le gain d'une antenne

Le gain (G) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction et la puissance que rayonnerait directement la source isotrope de l'antenne. Le gain est calculé par l'équation suivante :

$$G = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_a}{4\pi}} \quad (0.9)$$

Avec P_a la puissance d'alimentation délivrée par la source isotrope en W.

Le gain est souvent exprimé en décibels, ici plus précisément en dBi (gain d'antenne comparé à l'antenne isotrope) :

$$G = 10 \log \left(\frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_a}{4\pi}} \right) \quad (0.10)$$

Le gain peut également s'exprimer en fonction de la directivité :

$$G = \eta D \quad (0.11)$$

Avec η le rendement de l'antenne qui est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance d'alimentation : $P_r = \eta P_a$

4. Adaptation d'une antenne

Pour minimiser le nombre de réflexions entre la source et l'antenne, il est important que les deux soit adaptés en impédance. Soit l'impédance d'une antenne Z_a et l'impédance caractéristique de la ligne Z_c . Que ce soit en réflexion ou en transmission, le coefficient de réflexion est le même :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_c}{Z_a + Z_c} \quad (0.12)$$

L'adaptation s'obtient alors lorsque $Z_a = Z_c$. Il est possible de voir cette adaptation avec la méthode des paramètres S, en effet les paramètres S11 et S22 traduisent la réflexion. Ceux-ci doivent être minimisés à la fréquence de résonance de l'antenne, c'est le processus d'adaptation.

5. La permittivité électromagnétique

La permittivité diélectrique (ε en F.m^{-1}) est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué. Pour les substrats la permittivité relative sera utilisée, c'est-à-dire le rapport entre la permittivité diélectrique du milieu et celle du vide (ε_0).

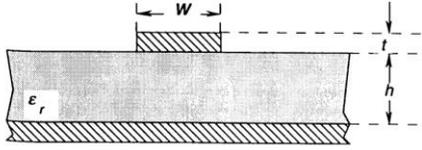
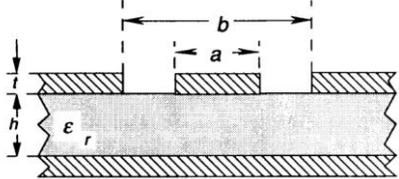
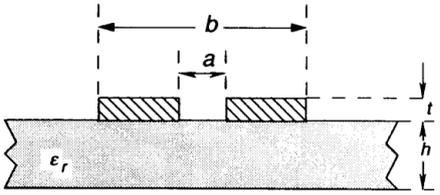
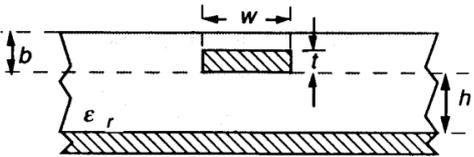
$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (0.13)$$

Dans un milieu diélectrique, les pertes du matériau ($\tan\delta$) sont définies par la permittivité complexe :

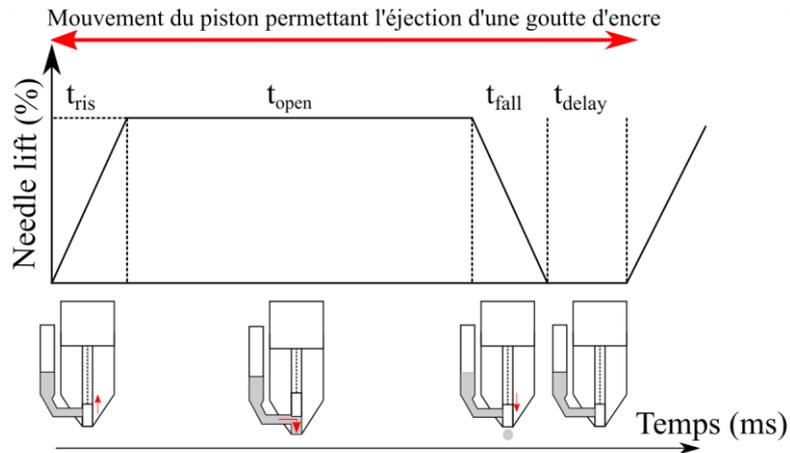
$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + i\varepsilon_r'') \quad (0.14)$$

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (0.15)$$

Annexe C : Exemples de structures de lignes de transmission [144]

Ligne micro-ruban	
Ligne coplanaire avec plan de masse	
Ligne à fente	
Ligne intégrée au substrat	

Annexe D : Conditions de limites maximales et minimales des paramètres d'impression de la tête Vermes



	<i>Conditions de valeur minimale</i>	<i>Conditions de valeur maximale</i>
t_{ris}	<p>Si... $NL \geq 10\%$</p> <p>Alors... $t_{ris} \geq \frac{3xNL}{10} \text{ ms}$</p> <p>Sinon... $t_{ris} \geq 0,01 \text{ ms}$</p>	$t_{ris} \leq 300 \text{ ms}$
t_{fall}	<p>Si... $NL \geq 10\%$</p> <p>Alors... $t_{fall} \geq \frac{NL}{10} \text{ ms}$</p> <p>Sinon... $t_{fall} \geq 0,01 \text{ ms}$</p>	$t_{fall} \leq 300 \text{ ms}$
t_{open}	$t_{open} \geq 0 \text{ ms}$	<p>Si... $NL=1-80\% \rightarrow t_{open} \leq 3000 \text{ ms}$ $NL=81-100\% \rightarrow t_{open} \leq 15 \text{ ms}$</p>
NL	1%	100%
t_{delay}	0,1 ms	1000 ms

Annexe E : Méthode de Mangan

La fonction Swap utilisée dans la démonstration est définie comme :

$$\text{Swap}\left(\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} D & C \\ B & A \end{bmatrix} \quad (0.16)$$

Une ligne coplanaire de longueur l_i peut être décrite par la formule suivante (Figure 0-4) :

$$M_{l_i}^t = M_{P1} M_{l_i} M_{P2} \quad (0.17)$$

Avec

- $M_{l_i}^t$ la matrice ABCD de la ligne de longueur l_i
- M_{P1} et M_{P2} respectivement les matrices ABCD des pads de gauche et de droite

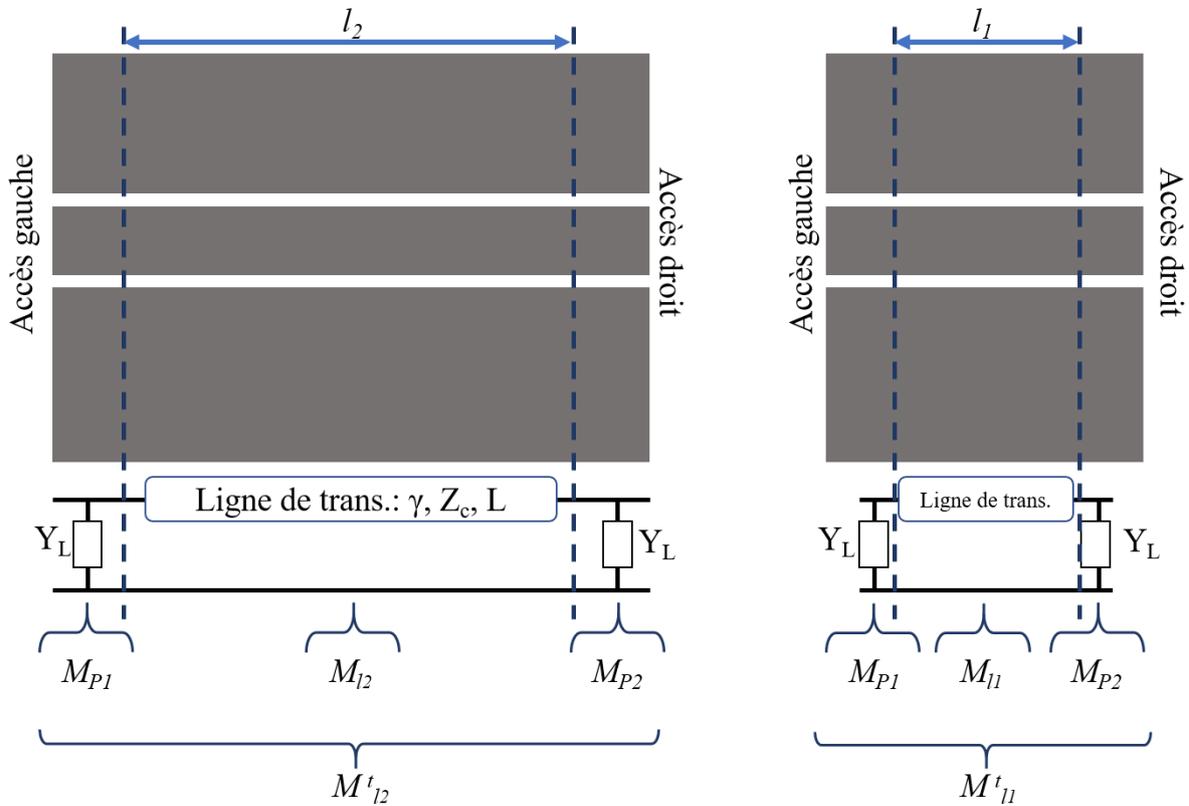


Figure 0-4 : Schéma des lignes de longueur 1 et 2

Ensuite, la matrice appelée « hybride » $M_{l_2-l_1}^h$ car comporte encore un accès est posée comme :

$$M_{l_2-l_1}^h = M_{l_2}^t [M_{l_1}^t]^{-1} = M_{P1} M_{l_2} M_{l_1}^{-1} M_{P1}^{-1} = M_{P1} M_{l_2-l_1} M_{P1}^{-1} \quad (0.18)$$

Avec

- $M_{l_2-l_1}^h$ la matrice hybride
- $M_{l_2-l_1}$ la matrice ABCD d'une ligne de longueur l_2-l_1 .

La matrice hybride de transformation est maintenant écrite en matrice Y :

$$Y_{l_2-l_1}^h = Y_{l_2-l_1} + \begin{bmatrix} Y_L & 0 \\ 0 & -Y_L \end{bmatrix} \quad (0.19)$$

Avec :

- $Y_{l_2-l_1}^h$ le paramètre Y de la matrice $M_{l_2-l_1}^h$
- $Y_{l_2-l_1}$ le paramètre Y de la matrice $M_{l_2-l_1}$
- Y_L l'admittance des pads

Un Swap est appliqué à cette matrice et $Y_{l_2-l_1}$ étant symétrique :

$$\text{Swap}(Y_{l_2-l_1}^h) = \text{Swap}(Y_{l_2-l_1}) + \begin{bmatrix} -Y_L & 0 \\ 0 & Y_L \end{bmatrix} = Y_{l_2-l_1} + \begin{bmatrix} -Y_L & 0 \\ 0 & Y_L \end{bmatrix} \quad (0.20)$$

La matrice hybride d'admittance additionnée à son Swap annule les effets des pads gauche et droit :

$$Y_{l_2-l_1}^h + \text{Swap}(Y_{l_2-l_1}^h) = 2 \cdot Y_{l_2-l_1} \quad (0.21)$$

Finalement, la formule suivante est obtenue :

$$Y_{l_2-l_1} = \frac{Y_{l_2-l_1}^h + \text{Swap}(Y_{l_2-l_1}^h)}{2} \quad (0.22)$$

Connaissant la matrice $Y_{l_2-l_1}^h$ avec l'équation(0.21), il est possible de calculer $Y_{l_2-l_1}$ et donc $M_{l_2-l_1}$.

La matrice ABCD d'une ligne coplanaire peut s'exprimer en fonction de Z_c et γ [145] telle que :

$$M_{l_2-l_1} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\gamma(l_2 - l_1) & Z_c \sinh\gamma(l_2 - l_1) \\ Z_c^{-1} \sinh\gamma(l_2 - l_1) & \cosh\gamma(l_2 - l_1) \end{bmatrix} \quad (0.23)$$

Ainsi :

$$Z_c = \sqrt{\frac{B}{C}} \quad \gamma = \frac{\cosh^{-1}A}{l_2 - l_1} \quad (0.24)$$

Avec :

- Z_c l'impédance caractéristique en ohm
- γ la constante de propagation

En obtenant ces deux paramètres, il est alors possible de calculer tous les paramètres primaires RLGC d'après les équations (III.10) et (III.11) :

$$\gamma \cdot Z_c = R + jL\omega \quad \frac{\gamma}{Z_c} = G + jC\omega \quad (0.25)$$

Annexe F : Méthode LH

Dans cette méthode l'exposant de propagation est extrait par la méthode Janezic [171] en calculant les valeurs propres de la matrice de transfert T qui décrit une ligne de transmission idéal :

$$M^{ij} = XT^{ij}X^{-1} \quad (0.26)$$

Avec

- M^{ij} est la matrice de cascade mesurée de deux dispositifs intégrant respectivement deux lignes de transmission de longueurs différentes i et j et de sections identiques
- T^i est la matrice de cascade idéale de dispositifs intégrant respectivement deux lignes de transmission de longueurs différentes i et j
- X représente les imperfections de la mesure : les erreurs systématiques du VNA, la connectique allant au dispositif et les accès à la ligne de transmission. On suppose que ces imperfections sont similaires pour chaque ligne.

T^{ij} est une matrice diagonale :

$$T^{ij} = \begin{bmatrix} e^{-\gamma l_{ij}} & 0 \\ 0 & e^{\gamma l_{ij}} \end{bmatrix} \quad (0.27)$$

Alors les valeurs propres sont les mêmes que celles de la matrice M^{ij} :

$$\lambda_{T1}^{ij}, \lambda_{T2}^{ij} = e^{\pm \gamma l_{ij}} \quad (0.28)$$

$$\lambda_{M1}^{ij}, \lambda_{M2}^{ij} = \frac{M_{11}^{ij} + M_{22}^{ij} \pm \sqrt{(M_{11}^{ij} + M_{22}^{ij})^2 + 4M_{12}^{ij}M_{21}^{ij}}}{2} \quad (0.29)$$

Ainsi en combinant (0.30) et (0.31), on extrait l'exposant de propagation des 2 lignes qui est identiques (lignes de même section) :

$$\gamma = \frac{\ln(\lambda^{ij})}{l_i - l_j} \quad (0.32)$$

Avec λ^{ij} la moyenne entre les deux valeurs propres λ_{M1}^{ij} et λ_{M2}^{ij} .

Pour extraire l'impédance caractéristique Z_c , la méthode expliquée dans l'article [156] est appliquée. Elle consiste à mesurer 2 dispositifs intégrant chacun 2 lignes de transmission de même section mais de longueurs différentes. Sur la Figure 0-5 : Schéma des véhicules de test (VT) et leur schéma électrique équivalent [156], les matrices ABCD sont positionnées.

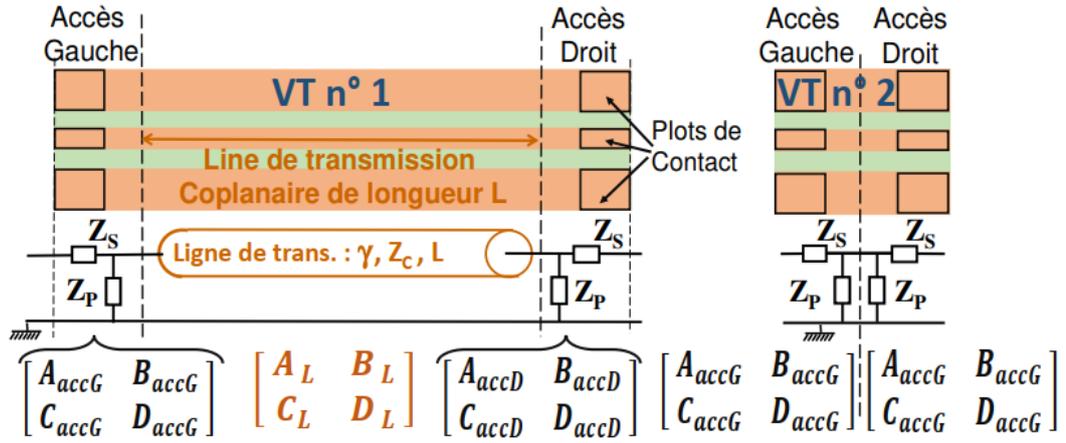


Figure 0-5 : Schéma des véhicules de test (VT) et leur schéma électrique équivalent [156]

Pour obtenir l'impédance caractéristique Z_c , la matrice ABCD de la ligne de transmission est calculée :

$$\begin{bmatrix} A_L & B_L \\ C_L & D_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) & Z_c \sinh(\gamma L) \\ Z_c^{-1} \sinh(\gamma L) & \cosh(\gamma L) \end{bmatrix} \quad (0.33)$$

La matrice ABCD du véhicule de test 1 (VT1) est équivalente au produit des matrices de l'accès de gauche, de la ligne de transmission et de l'accès de droite, alors :

$$\begin{bmatrix} A_L & B_L \\ C_L & D_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{accG} & B_{accG} \\ C_{accG} & D_{accG} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{VT1} & B_{VT1} \\ C_{VT1} & D_{VT1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{accD} & B_{accD} \\ C_{accD} & D_{accD} \end{bmatrix}^{-1} \quad (0.34)$$

Afin de déterminer les matrices ABCD des accès, il est possible de déterminer Z_p et Z_s avec l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} A_{VT2} & B_{VT2} \\ C_{VT2} & D_{VT2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{accG} & B_{accG} \\ C_{accG} & D_{accG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{accD} & B_{accD} \\ C_{accD} & D_{accD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_s}{Z_p} & Z_s \\ \frac{1}{Z_p} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ \frac{1}{Z_p} & 1 + \frac{Z_s}{Z_p} \end{bmatrix} \quad (0.35)$$

Alors :

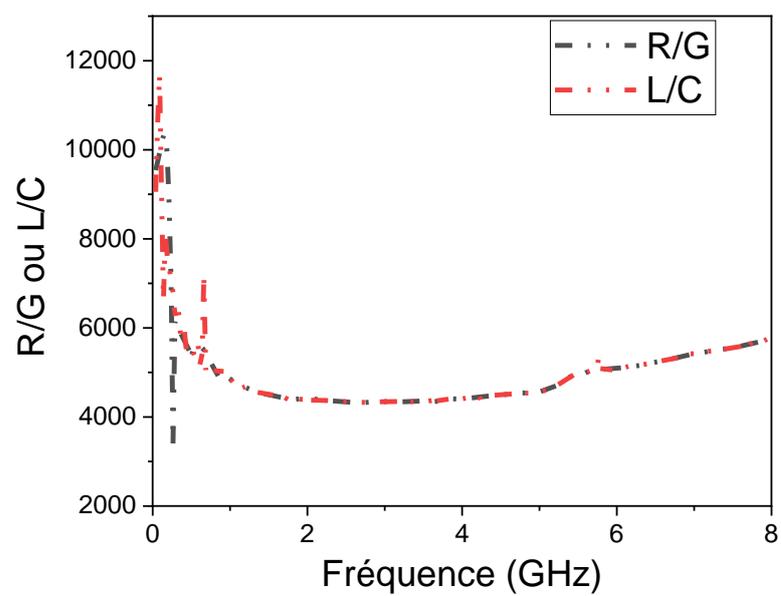
$$Z_p = \frac{2}{C_{VT2}} \quad Z_s = \frac{(A_{VT2} - 1)}{C_{VT2}} \quad (0.36)$$

Ainsi il est possible de calculer Z_c . En connaissant Z_c et γ , il est possible de calculer les paramètres RLGC avec l'équation (0.37).

$$Z_c = \sqrt{\frac{B}{C}} \quad (0.37)$$

Annexe G : Ligne à minimisation de pertes

Les courbes $\frac{R}{G}$ et $\frac{L}{C}$ se superposent, on peut en déduire que $\frac{R}{G} = \frac{L}{C}$ et donc que ces lignes de transmission coplanaires sont des lignes à minimisation de pertes.



Annexe H : Détermination des incertitudes sur le calcul de la conductivité des lignes imprimées

Pour cette étude, un calcul d'incertitudes a été réalisé afin de déterminer précisément la conductivité des pistes.

Le calcul de l'incertitude type pour une série de N mesure x est le suivant :

$$u(x) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - x)^2} \quad (0.38)$$

Le calcul de l'incertitude type pour une mesure, ici L , U et I , est le suivant :

$$u(x) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (0.39)$$

Pour chacun des cas, l'incertitude élargie est calculée, $k=2$ est choisie pour un niveau de confiance à 95% :

$$\Delta u(x) = ku(x) \quad (0.40)$$

La propagation des incertitudes appliquées aux équations sont les suivantes :

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} \quad (0.41)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2} \quad (0.42)$$

Avec:

- $\Delta\sigma$, ΔR , ΔL , ΔS , ΔU et ΔI sont les incertitudes élargies
- σ , R , L , S , U et I sont les valeurs mesurées expérimentalement

Annexe I : Perspectives d'adaptation de lignes coplanaires pour le procédé jetting

Les lignes de transmission maillées consistent à ne pas remplir complètement la surface des rubans latéraux de masse mais à imprimer un maillage comme présenté en Figure 0-6. Cela permet de diminuer le temps d'impression et de minimiser la consommation d'encre. Dans cette partie, une ligne de transmission maillée est imprimée et mesurée.

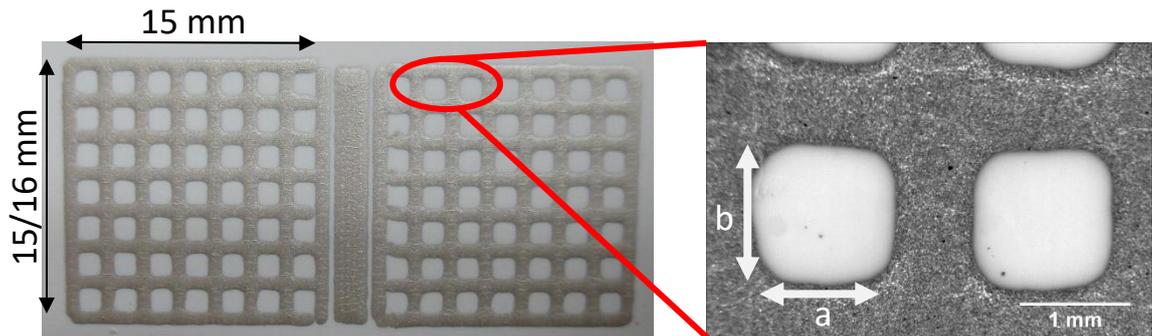


Figure 0-6 : Photographie de la ligne de transmission avec plans de masse maillés

Un prototype a été réalisé avec des dimensions plus importantes que les lignes coplanaires imprimées dans l'étude précédente (Tableau 47). Les mailles ont une taille de 1,3x1,3 mm. L'économie d'encre peut ainsi être calculée avec la formule suivante :

$$\frac{\text{Surface maillée sans encre}}{\text{Surface imprimée pleine}} \times 100 = 39\% \text{ d'encre économisée} \quad (0.43)$$

Les mailles doivent également respecter la condition de Bragg afin d'éviter des réflexions à cause du milieu discontinu [126]. La fréquence maximale se calcule avec l'équation suivante :

$$f_{bragg} = \frac{v}{a + b} \quad (0.44)$$

Pour la ligne coplaire présentée, $f_{bragg} = 62 \text{ GHz}$ ce qui est une valeur bien plus élevée que la fréquence maximale mesurée dans cette étude.

La mesure est réalisée de 0,1 à 15 GHz. Les paramètres S sont présentés en Figure 0-7. Les lignes de transmission étant plus longues que les lignes coplanaires V8, il y a des résonances (7,5 GHz et 14 GHz). Le paramètre S_{11} est en dessous de -10 dB de 0,1 à 15 GHz et le paramètre S_{12} est à $-1,6 \pm 0,1 \text{ dB}$. La transmission est correcte de 0,1 à 15 GHz. Les courbes sont similaires, la reproductibilité du procédé est donc validée pour les lignes coplanaires maillées.

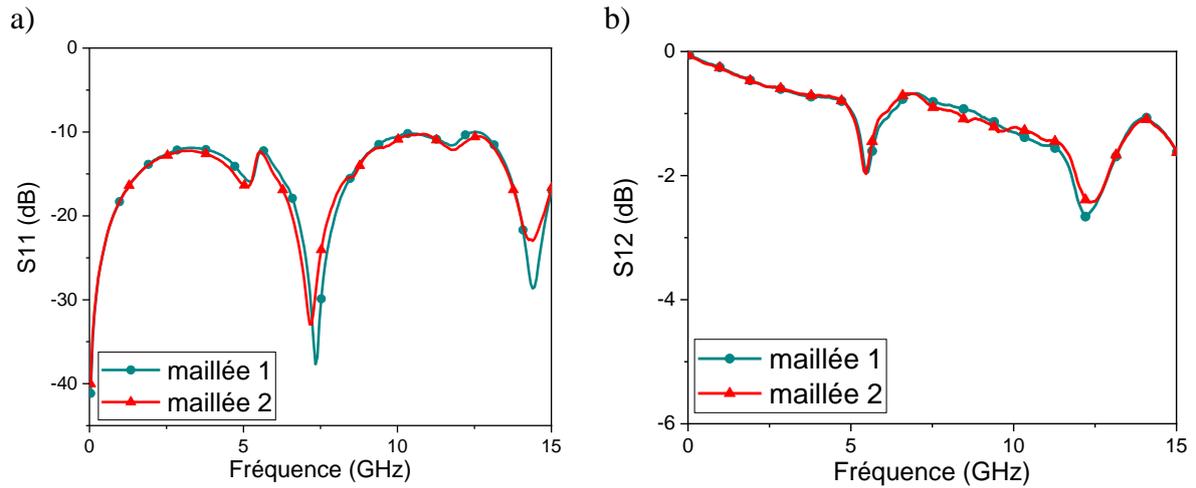


Figure 0-7 : a) Paramètres S_{11} et b) S_{12} de lignes coplanaires à plans de masse maillés

Le principe de la ligne coplanaire maillée fonctionne avec la technologie jetting 3D de 0,1 à 15 GHz. Pour approfondir cette étude, il faudrait comparer des plans de masse maillés et non maillé, et également étudier l'impact des tailles de la maille.

Liste des communications

- C. Delfaut, T.-P. Vuong, N. Reverdy-Bruas, D. Curtil, and C. Venet, “New potential of a direct printed LoRa antenna,” in *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Jul. 2019, pp. 1779–1780. doi:[10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889325](https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889325).
- C. Delfaut, T.-P. Vuong, A. Niembro-Martin, T. Lacrevez, Q.-B. Duong, D. Paulet, D. Curtil, J.-E. Broquin, C. Venet, N. Reverdy-Bruas, “Study of feasibility for 2D and 3D innovative jet printed RF devices” *European Conference on antenna and propagation*, 2022
- T.-H.-L. Dam, C. Delfaut, G. Houzet, T. Lacrevez, A. Niembro-Martin, Q.-B. Duong, N. Reverdy-Bruas, T.-P. Vuong, “Printed radome for reconfigurable antenna radiation pattern in 5G applications,” *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting* p. 2, 2021.
- N. Reverdy-Bruas, C. Delfaut, D. Curtil, Q.-B. Duong, A. Niembro-Martin, D. Paulet, V. Thenot, C. Venet, T.-P. Vuong, “3D Electronic integration on thermoplastic parts with a 6-axes robot” *LOPEC 2022*

Glossaire : Acronymes

CIJ : *Continuous InkJet* ou jet d'encre en continue.

CPW : (*Coplanar Waveguide*) Structure de lignes de transmission.

DOD : *Drop On Demand* ou jet d'encre par méthode discrète

FDM : (*Fused Deposition Modeling*) Technologie d'impression 3D qui dépose un filament de matériau fondu afin de former une pièce.

IDE : (*Impression Directe d'Encre*) Technique d'impression par dépôt d'encre.

LCVD : (*Laser Chemical Vapor Deposition* ou dépôt chimique en phase vapeur) Méthode de dépose sous vide de films minces.

LDS : (*Laser Direct Structuring* ou Structuration laser directe) Technologie plastronique qui implique l'utilisation d'un laser afin de métalliser des pièces plastiques.

LIFT : (*Laser Induced Forward Transfer* ou transfert induit par laser) Technique d'impression directe consistant à imprimer une fraction de matériau sur un substrat par l'action d'un laser.

LOM : (*Laminated Object Manufacturing* ou fabrication d'objet par laminage) Technologie d'impression 3D qui consiste à coller des feuilles de matériaux ensemble.

LoRa : technologie utilisant le réseau LoRaWAN (*Long range Wide -area network*)

MAPLE : (*Matrix Assisted Pulsed Laser dirEct write* ou Matrice assistée par laser pulsé) Technique similaire au LIFT pour d'autres mécanismes de transfert.

MID : *Molded Interconnected Devices* ou objets plastroniques

OL_L/OL_W : Respectivement recouvrement longitudinal et latérale des gouttes.

PC : Substrat plastique polycarbonate

PC+ABS : Substrat plastique principalement utilisé dans ce travail, Polycarbonate et Acrylonitrile Butadiène Styrène.

PEN : Substrat plastique polynaphtalate d'éthylène

PET : Substrat plastique polytéraphthalate d'éthylène

PI : Substrat plastique polyimide

POM : plastique polymère polyoxyméthylène

RFID : *Radio Frequency Identification* ou radio identification est une méthode pour mémoriser et récupérer des données à petite distance.

SLA : (Stéréolithographie) Technique d'impression induisant un laser afin de transformer une résine liquide en un plastique solide, grâce à la photopolymérisation.

SLS : (*Selective Laser Sintering* ou frittage laser sélectif) Technique d'impression basée sur la fusion d'un matériau sous forme de poudre par un laser.

TEM : Transverse électromagnétique

TRL : (*Technology Readiness Level*) Indicateur qui désigne le degré de maturité d'une technologie

VNA : Analyseur de réseaux vectoriel

Références

- [1] M. Hüske, J. Kickelhain, J. Müller, G. Eßer, LASER SUPPORTED ACTIVATION AND ADDITIVE METALLIZATION OF THERMOPLASTICS FOR 3D-MIDS, (n.d.) 12.
- [2] O. Rusanen, T. Simula, P. Niskala, V. Lindholm, M. Heikkinen, Injection Molded Structural Electronics Brings Surfaces to Life, in: 2019 22nd European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition (EMPC), IEEE, Pisa, Italy, 2019: pp. 1–7. <https://doi.org/10.23919/EMPC44848.2019.8951795>.
- [3] J.A. Lewis, Direct Ink Writing of 3D Functional Materials, *Adv. Funct. Mater.* 16 (2006) 2193–2204. <https://doi.org/10.1002/adfm.200600434>.
- [4] M. Bakr, F. Bossuyt, J. Vanfleteren, Y. Su, Flexible Microsystems Using Over-molding Technology, *Procedia Manufacturing*. 52 (2020) 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.11.006>.
- [5] R. Koiva, M. Zenker, C. Schurmann, R. Haschke, H.J. Ritter, A highly sensitive 3D-shaped tactile sensor, in: 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE, Wollongong, NSW, 2013: pp. 1084–1089. <https://doi.org/10.1109/AIM.2013.6584238>.
- [6] E. Macdonald, R. Salas, D. Espalin, M. Perez, E. Aguilera, D. Muse, R.B. Wicker, 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics, *IEEE Access*. 2 (2014) 234–242. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2311810>.
- [7] Olivier Barroso, Pierre Joly, Etude-plastronique-Final.pdf, Normandie aerospace, 2019.
- [8] F. Tricot, C. Venet, D. Beneventi, D. Curtil, D. Chaussy, T.P. Vuong, J.E. Broquin, N. Reverdy-Bruas, Ohmic Curing of Silver Micro-Particle Inks Printed on Thermoplastics, *J. Electron. Mater.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09145-7>.
- [9] B. Bachy, J. Franke, Modeling and optimization of laser direct structuring process using artificial neural network and response surface methodology, *10.5267/j.ijiec*. 6 (2015) 553–564. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2015.4.003>.
- [10] S. Kamotesov, Transmission d'énergie par induction électromagnétique en plastronique 3D, Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, ED - Electronique, Electrotechnique et Automatique de Lyon, 2019.
- [11] B. Bachy, J. Franke, Simulation of laser structuring by three dimensional heat transfer model, in: 2014 9th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), IEEE, Taipei, Taiwan, 2014: pp. 437–444. <https://doi.org/10.1109/IMPACT.2014.7048377>.
- [12] B. Bachy, Experimental Investigation and Optimization for the Effective Parameters in the Laser Direct Structuring Process, *JLMN*. 10 (2015) 202–209. <https://doi.org/10.2961/jlmn.2015.02.0018>.
- [13] H. Horn, S. Beil, D.A. Wesner, R. Weichenhain, E.W. Kreutz, Excimer laser pretreatment and metallization of polymers, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 151 (1999) 279–284. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00074-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00074-9).
- [14] S.H. Kim, S.H. Cho, N.-E. Lee, H.M. Kim, Y.W. Nam, Y.-H. Kim, Adhesion properties of Cu/Cr films on polyimide substrate treated by dielectric barrier discharge plasma, *Surface and Coatings Technology*. 193 (2005) 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.130>.
- [15] S. Balzereit, F. Proes, V. Altstädt, C. Emmelmann, Properties of copper modified polyamide 12-powders and their potential for the use as laser direct structurable electronic circuit carriers, *Additive Manufacturing*. 23 (2018) 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.016>.

- [16] M. Bakr, Y. Su, F. Bossuyt, J. Vanfleteren, Effect of overmolding process on the integrity of electronic circuits, in: 2019 22nd European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition (EMPC), IEEE, Pisa, Italy, 2019: pp. 1–8. <https://doi.org/10.23919/EMPC44848.2019.8951797>.
- [17] A. Huttunen, T. Kurkela, K.-L. Vaisanen, E. Juntunen, Multilayer plastic substrate for electronics, in: 2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), IEEE, Dresden, 2018: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ESTC.2018.8546335>.
- [18] S. Stoukatch, F. Dupont, L. Seronveaux, D. Vandormael, M. Kraft, Additive low temperature 3D printed electronic as enabling technology for IoT application, in: 2017 IEEE 19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), IEEE, Singapore, Singapore, 2017: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/EPTC.2017.8277554>.
- [19] D. Tobjörk, R. Österbacka, Paper Electronics, *Advanced Materials*. 23 (2011) 1935–1961. <https://doi.org/10.1002/adma.201004692>.
- [20] Z. Cui, *Printed Electronics*, (n.d.) 358.
- [21] K.K.B. Hon, L. Li, I.M. Hutchings, Direct writing technology—Advances and developments, *CIRP Annals*. 57 (2008) 601–620. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.006>.
- [22] D. Tobjörk, H. Aarnio, P. Pulkkinen, R. Bollström, A. Määttänen, P. Ihalainen, T. Mäkelä, J. Peltonen, M. Toivakka, H. Tenhu, R. Österbacka, IR-sintering of ink-jet printed metal-nanoparticles on paper, *Thin Solid Films*. 520 (2012) 2949–2955. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.10.017>.
- [23] S.G. Kirtania, M.A. Riheen, S.U. Kim, K. Sekhar, A. Wisniewska, P.K. Sekhar, Inkjet Printing on a New Flexible Ceramic Substrate for Internet of Things (IoT) Applications, *Micromachines*. 11 (2020) 841. <https://doi.org/10.3390/mi11090841>.
- [24] A. Eshkeiti, A.S.G. Reddy, S. Emamian, B.B. Narakathu, M. Joyce, M. Joyce, P.D. Fleming, B.J. Bazuin, M.Z. Atashbar, Screen Printing of Multilayered Hybrid Printed Circuit Boards on Different Substrates, *IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol.* 5 (2015) 415–421. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2391012>.
- [25] W.A. MacDonald, M.K. Looney, D. MacKerron, R. Eveson, R. Adam, K. Hashimoto, K. Rakos, Latest advances in substrates for flexible electronics, *J. Soc. Inf. Display*. 15 (2007) 1075. <https://doi.org/10.1889/1.2825093>.
- [26] V. Thenot, Impression et recuits sélectifs d’encres métalliques sur papier – Optimisation des propriétés électriques de boucles RFID-HF en vue d’une production industrielle, Thèse de Doctorat de l’UGA (2016).
- [27] H. Kipphan, ed., *Handbook of print media: technologies and production methods*, Springer, Berlin ; New York, 2001.
- [28] F. Villani, P. Vacca, G. Nenna, O. Valentino, G. Burrasca, T. Fasolino, C. Minarini, D. della Sala, Inkjet Printed Polymer Layer on Flexible Substrate for OLED Applications, *J. Phys. Chem. C*. 113 (2009) 13398–13402. <https://doi.org/10.1021/jp8095538>.
- [29] T.M. Eggenhuisen, Y. Galagan, A. Biezemans, M. Coenen, J. Gilot, P. Groen, R. Andriessen, Organic photovoltaic cells with all inkjet printed layers and freedom of form, in: 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE, Denver, CO, USA, 2014: pp. 2842–2845. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6925523>.
- [30] M. Hamsch, K. Reuter, M. Stanel, G. Schmidt, H. Kempa, U. Fügmann, U. Hahn, A.C. Hübler, Uniformity of fully gravure printed organic field-effect transistors, *Materials Science and Engineering: B*. 170 (2010) 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.02.035>.
- [31] F.C. Krebs, M. Jørgensen, K. Norrman, O. Hagemann, J. Alstrup, T.D. Nielsen, J. Fyenbo, K. Larsen, J. Kristensen, A complete process for production of flexible large area polymer solar cells entirely using screen printing—First public demonstration, *Solar Energy*

- Materials and Solar Cells. 93 (2009) 422–441. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.12.001>.
- [32] H.W. Tan, J. An, C.K. Chua, T. Tran, Metallic Nanoparticle Inks for 3D Printing of Electronics, *Adv. Electron. Mater.* 5 (2019) 1800831. <https://doi.org/10.1002/aelm.201800831>.
- [33] B. Marinho, M. Ghislandi, E. Tkalya, C.E. Koning, G. de With, Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder, *Powder Technology*. 221 (2012) 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.01.024>.
- [34] F. Liu, X. Qiu, J. Xu, J. Huang, D. Chen, G. Chen, High conductivity and transparency of graphene-based conductive ink: Prepared from a multi-component synergistic stabilization method, *Progress in Organic Coatings*. 133 (2019) 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.043>.
- [35] E. Bihar, T. Roberts, M. Saadaoui, T. Hervé, J.B. De Graaf, G.G. Malliaras, Inkjet-Printed PEDOT:PSS Electrodes on Paper for Electrocardiography, *Advanced Healthcare Materials*. 6 (2017) 1601167. <https://doi.org/10.1002/adhm.201601167>.
- [36] A. Loiseau, P. Launois, P. Petit, S. Roche, J.-P. Salvetat, eds., *Understanding Carbon Nanotubes: From Basics to Applications*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006. <https://doi.org/10.1007/b10971390>.
- [37] X. Liang, H. Li, J. Dou, Q. Wang, W. He, C. Wang, D. Li, J.-M. Lin, Y. Zhang, Stable and Biocompatible Carbon Nanotube Ink Mediated by Silk Protein for Printed Electronics, *Advanced Materials*. 32 (2020) 2000165. <https://doi.org/10.1002/adma.202000165>.
- [38] X. Xia, C. Xie, S. Cai, Z. Yang, X. Yang, Corrosion characteristics of copper microparticles and copper nanoparticles in distilled water, *Corrosion Science*. 48 (2006) 3924–3932. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.04.007>.
- [39] W. Li, L. Li, Y. Gao, D. Hu, C.-F. Li, H. Zhang, J. Jiu, S. Nagao, K. Suganuma, Highly conductive copper films based on submicron copper particles/copper complex inks for printed electronics: Microstructure, resistivity, oxidation resistance, and long-term stability, *Journal of Alloys and Compounds*. 732 (2018) 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.193>.
- [40] P. Tiwari, K. Vig, V. Dennis, S. Singh, Functionalized Gold Nanoparticles and Their Biomedical Applications, *Nanomaterials*. 1 (2011) 31–63. <https://doi.org/10.3390/nano1010031>.
- [41] D. Sette, Functional printing: from the study of printed layers to the prototyping of flexible devices, (n.d.) 209.
- [42] X. Zhang, W. Li, D. Wu, Y. Deng, J. Shao, L. Chen, D. Fang, Size and shape dependent melting temperature of metallic nanomaterials, *J. Phys.: Condens. Matter*. 31 (2019) 075701. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aaf54b>.
- [43] C. Decker, Polymérisation sous rayonnement UV, (2000) 19.
- [44] E. Sowade, H. Kang, K.Y. Mitra, O.J. Weiß, J. Weber, R.R. Baumann, Roll-to-roll infrared (IR) drying and sintering of an inkjet-printed silver nanoparticle ink within 1 second, *Journal of Materials Chemistry C*. 3 (2015) 11815–11826. <https://doi.org/10.1039/C5TC02291F>.
- [45] A. Denneulin, A. Blayo, C. Neuman, J. Bras, Infra-red assisted sintering of inkjet printed silver tracks on paper substrates, *J Nanopart Res*. 13 (2011) 3815–3823. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0306-2>.
- [46] Y.-R. Jang, C.-H. Ryu, Y.-T. Hwang, H.-S. Kim, Optimization of Intense Pulsed Light Sintering Considering Dimensions of Printed Cu Nano/Micro-paste Patterns for Printed Electronics, *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech*. 8 (2021) 471–485. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00180-8>.

- [47] H.-S. Kim, S.R. Dhage, D.-E. Shim, H.T. Hahn, Intense pulsed light sintering of copper nanoink for printed electronics, *Appl. Phys. A.* 97 (2009) 791–798. <https://doi.org/10.1007/s00339-009-5360-6>.
- [48] D.J. Lee, S.H. Park, S. Jang, H.S. Kim, J.H. Oh, Y.W. Song, Pulsed light sintering characteristics of inkjet-printed nanosilver films on a polymer substrate, *Journal of Micromechanics and Microengineering.* 21 (2011) 125023. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/21/12/125023>.
- [49] J. West, M. Carter, S. Smith, J. Sears, Photonic Sintering of Silver Nanoparticles: Comparison of Experiment and Theory, in: V. Shatokha (Ed.), *Sintering - Methods and Products*, InTech, 2012. <https://doi.org/10.5772/33519>.
- [50] J.S. Kang, J. Ryu, H.S. Kim, H.T. Hahn, Sintering of Inkjet-Printed Silver Nanoparticles at Room Temperature Using Intense Pulsed Light, *Journal of Electronic Materials.* 40 (2011) 2268–2277. <https://doi.org/10.1007/s11664-011-1711-0>.
- [51] S. Jang, D.J. Lee, D. Lee, J.H. Oh, Electrical sintering characteristics of inkjet-printed conductive Ag lines on a paper substrate, *Thin Solid Films.* 546 (2013) 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.05.015>.
- [52] P. Escobedo, M.A. Carvajal, J. Banqueri, A. Martinez-Olmos, L.F. Capitan-Vallvey, A.J. Palma, Comparative Study of Inkjet-Printed Silver Conductive Traces With Thermal and Electrical Sintering, *IEEE Access.* 7 (2019) 1909–1919. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2887113>.
- [53] A.T. Alastalo, T. Mattila, M.L. Allen, M.J. Aronniemi, J.H. Leppäniemi, K.A. Ojanperä, M.P. Suhonen, H. Seppä, Rapid Electrical Sintering of Nanoparticle Structures, *MRS Proceedings.* 1113 (2008). <https://doi.org/10.1557/PROC-1113-F02-07>.
- [54] D.A. Roberson, R.B. Wicker, E. MacDonald, Ohmic Curing of Printed Silver Conductive Traces, *Journal of Electronic Materials.* 41 (2012) 2553–2566. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-2140-4>.
- [55] L. Fu, S. Shang, E. Fearon, W. Perrie, S. Edwardson, G. Dearden, K. Watkins, A thermal investigation on conductive silver ink tracks cured on flexible substrates by repeating irradiations of Nd:YAG laser at the wavelength of 532 nm, in: *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Laser Institute of America, Anaheim, California, USA, 2012: pp. 1304–1310. <https://doi.org/10.2351/1.5062427>.
- [56] K. Maekawa, K. Yamasaki, T. Niizeki, M. Mita, Y. Matsuba, N. Terada, H. Saito, Influence of wavelength on laser sintering characteristics of Ag nanoparticles, in: *2009 59th Electronic Components and Technology Conference*, IEEE, San Diego, CA, USA, 2009: pp. 1579–1584. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2009.5074224>.
- [57] A.J. Lopes, I.H. Lee, E. MacDonald, R. Quintana, R. Wicker, Laser curing of silver-based conductive inks for in situ 3D structural electronics fabrication in stereolithography, *Journal of Materials Processing Technology.* 214 (2014) 1935–1945. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.009>.
- [58] A. Joe Lopes, E. MacDonald, R.B. Wicker, Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication, *Rapid Prototyping Journal.* 18 (2012) 129–143. <https://doi.org/10.1108/13552541211212113>.
- [59] T. Kumpulainen, J. Pekkanen, J. Valkama, J. Laakso, R. Tuokko, M. Mäntysalo, Low temperature nanoparticle sintering with continuous wave and pulse lasers, *Optics & Laser Technology.* 43 (2011) 570–576. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.08.002>.
- [60] I. Hendi, T. Lacondemine, G. Schneider, M. Fendler, Printing an anisotropic conductive film for structural electronics applications, in: *2021 IEEE 23rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, IEEE, Singapore, Singapore, 2021: pp. 108–110. <https://doi.org/10.1109/EPTC53413.2021.9663947>.

- [61] A. Khan, N. Rasmussen, V. Marinov, O.F. Swenson, Laser Sintering of Silver Nanomaterial on Polymer Substrates, *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*. 5 (2008) 77–86. <https://doi.org/10.4071/1551-4897-5.2.77>.
- [62] R. Lesyuk, W. Jillek, Y. Bobitski, B. Kotlyarchuk, Low-energy pulsed laser treatment of silver nanoparticles for interconnects fabrication by ink-jet method, *Microelectronic Engineering*. 88 (2011) 318–321. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.11.037>.
- [63] J. Perelaer, B.-J. de Gans, U.S. Schubert, Ink-jet Printing and Microwave Sintering of Conductive Silver Tracks, *Adv. Mater.* 18 (2006) 2101–2104. <https://doi.org/10.1002/adma.200502422>.
- [64] J. Perelaer, R. Abbel, S. Wünscher, R. Jani, T. van Lammeren, U.S. Schubert, Roll-to-Roll Compatible Sintering of Inkjet Printed Features by Photonic and Microwave Exposure: From Non-Conductive Ink to 40% Bulk Silver Conductivity in Less Than 15 Seconds, *Adv. Mater.* 24 (2012) 2620–2625. <https://doi.org/10.1002/adma.201104417>.
- [65] Y.-T. Kwon, Y.-I. Lee, S. Kim, K.-J. Lee, Y.-H. Choa, Full densification of inkjet-printed copper conductive tracks on a flexible substrate utilizing a hydrogen plasma sintering, *Applied Surface Science*. 396 (2017) 1239–1244. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.122>.
- [66] I. Reinhold, C.E. Hendriks, R. Eckardt, J.M. Kranenburg, J. Perelaer, R.R. Baumann, U.S. Schubert, Argon plasma sintering of inkjet printed silver tracks on polymer substrates, *Journal of Materials Chemistry*. 19 (2009) 3384. <https://doi.org/10.1039/b823329b>.
- [67] S. Wünscher, S. Stumpf, A. Teichler, O. Pabst, J. Perelaer, E. Beckert, U.S. Schubert, Localized atmospheric plasma sintering of inkjet printed silver nanoparticles, *Journal of Materials Chemistry*. 22 (2012) 24569. <https://doi.org/10.1039/c2jm35586h>.
- [68] F. Tricot, C. Venet, D. Beneventi, D. Curtil, D. Chaussy, T.P. Vuong, J.E. Broquin, N. Reverdy-Bruas, Fabrication of 3D conductive circuits: print quality evaluation of a direct ink writing process, *RSC Adv.* 8 (2018) 26036–26046. <https://doi.org/10.1039/C8RA03380C>.
- [69] B. Li, P.A. Clark, K.H. Church, Robust Direct-Write Dispensing Tool and Solutions for Micro/Meso-Scale Manufacturing and Packaging, in: *ASME 2007 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, ASME, Atlanta, Georgia, USA, 2007: pp. 715–721. <https://doi.org/10.1115/MSEC2007-31037>.
- [70] Manuel d'utilisation du dispositif Nordson xQR41, (n.d.).
- [71] D. Hawatmeh, E. Rojas-Nastrucci, T. Weller, A multi-material 3D printing approach for conformal microwave antennas, in: *2016 International Workshop on Antenna Technology (IWAT)*, IEEE, Cocoa Beach, FL, USA, 2016: pp. 7–10. <https://doi.org/10.1109/IWAT.2016.7434785>.
- [72] M. Renn, B. King, M. Essien, K. David, Apparatus, methods and precision spray processes for direct write and maskless mesoscale material deposition, US 2004/0197493 A1, 2004.
- [73] M. Vaezi, S. Chianrabutra, B. Mellor, S. Yang, Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review: This review paper covers a decade of research on multiple material additive manufacturing technologies which can produce complex geometry parts with different materials, *Virtual and Physical Prototyping*. 8 (2013) 19–50. <https://doi.org/10.1080/17452759.2013.778175>.
- [74] M.E. Morales-Rodriguez, P.C. Joshi, J.R. Humphries, P.L. Fuhr, T.J. McIntyre, Fabrication of Low Cost Surface Acoustic Wave Sensors Using Direct Printing by Aerosol Inkjet, *IEEE Access*. 6 (2018) 20907–20915. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2824118>.
- [75] B. Obliers-Hommrich, A. Fischer, H. Willeck, W. Eberhardt, H. Kück, Single- and Multi-Layer Conductive Patterns Fabricated Using M³D Technology, (n.d.) 4.

- [76] D. Godlinski, R. Zichner, V. Zöllmer, R.R. Baumann, Printing technologies for the manufacturing of passive microwave components: antennas, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 11 (2017) 2010–2015. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0042>.
- [77] D. Zhao, T. Liu, J.G. Park, M. Zhang, J.-M. Chen, B. Wang, Conductivity enhancement of aerosol-jet printed electronics by using silver nanoparticles ink with carbon nanotubes, *Microelectronic Engineering*. 96 (2012) 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2012.03.004>.
- [78] J.A. Paulsen, M. Renn, K. Christenson, R. Plourde, Printing conformal electronics on 3D structures with Aerosol Jet technology, in: 2012 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings, IEEE, Gatlinburg, TN, USA, 2012: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/FIIW.2012.6378343>.
- [79] Y.-H. Chang, K. Wang, C. Wu, Y. Chen, C. Zhang, B. Wang, A facile method for integrating direct-write devices into three-dimensional printed parts, *Smart Materials and Structures*. 24 (2015) 065008. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/6/065008>.
- [80] A. Loughren, Controlled ink-jet copy reproducing apparatus, 1145653, 1965.
- [81] S. Yang, S. Zhen, A. Shamim, Fully Inkjet Printed 85GHz Band Pass Filter on Flexible Substrate, in: 2018 48th European Microwave Conference (EuMC), IEEE, Madrid, 2018: pp. 652–654. <https://doi.org/10.23919/EuMC.2018.8541504>.
- [82] A. Blayo, B. Pineaux, Printing processes and their potential for RFID printing, in: Proceedings of the 2005 Joint Conference on Smart Objects and Ambient Intelligence Innovative Context-Aware Services: Usages and Technologies - SOc-EUSAI '05, ACM Press, Grenoble, France, 2005: p. 27. <https://doi.org/10.1145/1107548.1107559>.
- [83] B. Derby, Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution, *Annu. Rev. Mater. Res.* 40 (2010) 395–414. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104502>.
- [84] R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel, T.A. Witten, Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops, *Nature*. 389 (1997) 827–829. <https://doi.org/10.1038/39827>.
- [85] A. Shimoni, S. Azoubel, S. Magdassi, Inkjet printing of flexible high-performance carbon nanotube transparent conductive films by “coffee ring effect,” *Nanoscale*. 6 (2014) 11084–11089. <https://doi.org/10.1039/C4NR02133A>.
- [86] X. Zhao†, J.R.G. Evans, M.J. Edirisinghe, J.-H. Song, Direct Ink-Jet Printing of Vertical Walls, *Journal of the American Ceramic Society*. 85 (2002) 2113–2115. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00414.x>.
- [87] Y. Zhang, S. Yang, L. Chen, J.R.G. Evans, Shape Changes during the Drying of Droplets of Suspensions, *Langmuir*. 24 (2008) 3752–3758. <https://doi.org/10.1021/la703484w>.
- [88] A. Chiolerio, M. Cotto, P. Pandolfi, P. Martino, V. Camarchia, M. Pirola, G. Ghione, Ag nanoparticle-based inkjet printed planar transmission lines for RF and microwave applications: Considerations on ink composition, nanoparticle size distribution and sintering time, *Microelectronic Engineering*. 97 (2012) 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2012.03.036>.
- [89] Y. Cui, W. Su, M. Tentzeris, A Novel 3D and inkjet printed pressure sensing button shaped resonator, *APS*. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2014.02.005>.
- [90] B.K. Tehrani, B.S. Cook, M.M. Tentzeris, Inkjet-printed 3D interconnects for millimeter-wave system-on-package solutions, in: 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), IEEE, San Francisco, CA, 2016: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2016.7540084>.
- [91] H. Yang, Y. He, C. Tuck, R. Wildman, I. Ashcroft, P. Dickens, R. Hague, HIGH VISCOSITY JETTING SYSTEM FOR 3D REACTIVE INKJET PRINTING, (n.d.) 9.

- [92] Y. Yang, S. Gu, J. Liu, H. Tian, Q. Lv, Research and Development of a 3D Jet Printer for High-Viscosity Molten Liquids, *Micromachines*. 9 (2018) 554. <https://doi.org/10.3390/mi9110554>.
- [93] X. Shu, H. Zhang, H. Liu, D. Xie, J. Xiao, Experimental study on high viscosity fluid micro-droplet jetting system, *Sci. China Ser. E-Technol. Sci.* 53 (2010) 182–187. <https://doi.org/10.1007/s11431-009-0329-4>.
- [94] S. Lu, H. Jiang, M. Li, J. Liu, S. Gu, X. Jiao, X. Liu, Nozzle and needle during high viscosity adhesive jetting based on piezoelectric jet dispensing, *Smart Mater. Struct.* 24 (2015) 105023. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/10/105023>.
- [95] S. Lu, G. Cao, H. Zheng, D. Li, M. Shi, J. Qi, Simulation and Experiment on Droplet Formation and Separation for Needle-Type Micro-Liquid Jetting Dispenser, *Micromachines*. 9 (2018) 330. <https://doi.org/10.3390/mi9070330>.
- [96] T.H. Phung, K.-S. Kwon, How to manipulate droplet jetting from needle type jet dispensers, *Sci Rep.* 9 (2019) 19669. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56198-0>.
- [97] G. Furia, Development of a robotic cell for the printing of electronic circuits on free form surfaces and industrial applications, UGA, (2021).
- [98] D. Zhao, T. Liu, J.G. Park, M. Zhang, J.-M. Chen, B. Wang, Conductivity enhancement of aerosol-jet printed electronics by using silver nanoparticles ink with carbon nanotubes, *Microelectronic Engineering*. 96 (2012) 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2012.03.004>.
- [99] Petit historique de la robotique, (2016). www.planeterobots.com.
- [100] H.A.F. Almurib, H.F. Al-Qrimli, N. Kumar, A review of application industrial robotic design, in: 2011 Ninth International Conference on ICT and Knowledge Engineering, IEEE, Bangkok, Thailand, (2012): pp. 105–112. <https://doi.org/10.1109/ICTKE.2012.6152387>.
- [101] K. Cheval, Étude et réalisation de circuits imprimés sur substrats polymères 3D (MID 3D) par microtamponnage, (n.d.) 197.
- [102] A. Jaafar, S. Schoinas, P. Passeraub, Pad-Printing as a Fabrication Process for Flexible and Compact Multilayer Circuits, *Sensors*. 21 (2021) 6802. <https://doi.org/10.3390/s21206802>.
- [103] S. Schoinas, A.-M. El Guamra, F. Moreillon, P. Passeraub, Fabrication and Characterization of a Flexible Fluxgate Sensor with Pad-Printed Solenoid Coils, *Sensors*. 20 (2020) 2275. <https://doi.org/10.3390/s20082275>.
- [104] J. Kunikowski, D. Bechevet, P. Passeraub, A. Veille, Towards a cheap, battery-less, wireless threshold temperature detector, in: 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, IEEE, Montreal, QC, Canada, (2020): pp. 1385–1386. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF35879.2020.9330483>.
- [105] B.-H. Lu, H.-B. Lan, H.-Z. Liu, 1State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China, 2Qingdao Engineering Research Center for 3D Printing, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China, 3Nanomanufacturing and Nano-Optoelectronics Lab, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China, Additive manufacturing frontier: 3D printing electronics, *Opto-Electronic Advances*. 1 (2018) 17000401–17000410. <https://doi.org/10.29026/oea.2018.170004>.
- [106] E. MacDonald, R. Wicker, Multiprocess 3D printing for increasing component functionality, *Science*. 353 (2016) aaf2093–aaf2093. <https://doi.org/10.1126/science.aaf2093>.
- [107] T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, D. Hui, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites*

- Part B: Engineering. 143 (2018) 172–196.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [108] M. Vaezi, H. Seitz, S. Yang, A review on 3D micro-additive manufacturing technologies, *Int J Adv Manuf Technol.* 67 (2013) 1721–1754.
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-4605-2>.
- [109] J. Mueller, K. Shea, C. Daraio, Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design, *Materials & Design.* 86 (2015) 902–912.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.129>.
- [110] H. Mazhar, T. Osswald, D. Negrut, On the use of computational multi-body dynamics analysis in SLS-based 3D printing, *Additive Manufacturing.* 12 (2016) 291–295.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.012>.
- [111] D. Klosterman, R. Chartoff, G. Graves, N. Osborne, B. Priore, Interfacial characteristics of composites fabricated by laminated object manufacturing, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 29 (1998) 1165–1174. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00088-8).
- [112] P. Delaporte, A.-P. Alloncle, [INVITED] Laser-induced forward transfer: A high resolution additive manufacturing technology, *Optics & Laser Technology.* 78 (2016) 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.022>.
- [113] X. Wu, Z. Zhou, Y. Wang, J. Li, Syntheses of Silver Nanowires Ink and Printable Flexible Transparent Conductive Film: A Review, *Coatings.* 10 (2020) 865.
<https://doi.org/10.3390/coatings10090865>.
- [114] Y. Ning, Y. Dong, Z. Wang, Y. Fan, A Novel Dual-Band WIFI Antenna with Frequency-Reconfigurability, in: 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 2020: pp. 67–68.
<https://doi.org/10.1109/IEEECONF35879.2020.9329757>.
- [115] D. Wang, C.H. Chan, Multiband Antenna for WiFi and WiGig Communications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.* 15 (2016) 309–312.
<https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2443013>.
- [116] C.-Z. Han, G.-L. Huang, T. Yuan, C.-Y.-D. Sim, A Dual-Band Millimeter-Wave Antenna for 5G Mobile Applications, in: 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019: pp. 1083–1084. <https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888328>.
- [117] A. Friedrich, M. Fengler, B. Geck, D. Manteuffel, 60 GHz 3D integrated waveguide fed antennas using laser direct structuring technology, in: 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), IEEE, Paris, France, 2017: pp. 2507–2510.
<https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928511>.
- [118] A. Cihangir, A bandwidth-enhanced antenna in LDS technology for LTE700 and GSM850/900 standards, (2013) 4.
- [119] C. Buey, T. Magounaki, F. Ferrero, P. Ratajczak, L. Lizzi, F. Kaltenberger, MIMO antenna performance assessment based on open source software defined radio, in: 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), IEEE, Paris, France, 2017: pp. 644–647. <https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928734>.
- [120] C. Delfaut, T.-P. Vuong, N. Reverdy-Bruas, D. Curtil, C. Venet, New potential of a direct printed LoRa antenna, in: 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019: pp. 1779–1780.
<https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889325>.
- [121] D. Unnikrishnan, D. Kaddour, S. Tedjini, Molded interconnect devices for RF applications: Transmission lines and low pass filters, in: 2012 International Symposium on Signals, Systems, and Electronics (ISSSE), IEEE, Potsdam, Germany, 2012: pp. 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ISSSE.2012.6374330>.

- [122] J.J. Adams, E.B. Duoss, T.F. Malkowski, M.J. Motala, B.Y. Ahn, R.G. Nuzzo, J.T. Bernhard, J.A. Lewis, Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces, *Advanced Materials*. 23 (2011) 1335–1340. <https://doi.org/10.1002/adma.201003734>.
- [123] P.I. Deffenbaugh, T.M. Weller, K.H. Church, Fabrication and Microwave Characterization of 3-D Printed Transmission Lines, *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* 25 (2015) 823–825. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2015.2495184>.
- [124] J.A. Qayyum, M. Abt, A. Roch, A.C. Ulusoy, J. Papapolymerou, Ultra Wideband 3D Interconnects using Aerosol Jet Printing up to 110 GHz, (2017) 4.
- [125] E.A. Rojas-Nastrucci, T. Weller, V.L. Aida, F. Cai, J. Papapolymerou, A study on 3D-printed coplanar waveguide with meshed and finite ground planes, in: *WAMICON 2014*, IEEE, Tampa, FL, USA, 2014: pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/WAMICON.2014.6857792>.
- [126] E.A. Rojas-Nastrucci, A.D. Snider, T.M. Weller, Propagation Characteristics and Modeling of Meshed Ground Coplanar Waveguide, *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 64 (2016) 3460–3468. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2606409>.
- [127] M. Liu, Y. Zhao, Y. Shao, Q. Zhang, C. Liu, 3D Printed Force Sensor with Inkjet Printed Piezoresistive Based Strain Gauge, in: *2018 IEEE SENSORS*, IEEE, New Delhi, 2018: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2018.8589771>.
- [128] J.G.D. Hester, M.M. Tentzeris, Y. Fang, Inkjet-printed, flexible, high performance, carbon nanomaterial based sensors for ammonia and DMMP gas detection, in: *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, IEEE, Paris, France, 2015: pp. 857–860. <https://doi.org/10.1109/EuMC.2015.7345899>.
- [129] A. Niembro Martin, Conception et développement de supports imprimables souples pour filtrage et adaptation des ondes électromagnétiques radiofréquences, Université Grenoble Alpes, 2015.
- [130] M.M. Seyedsharbaty, R.A. Sadeghzadeh, Antenna gain enhancement by using metamaterial radome at THz band with reconfigurable characteristics based on graphene load, *Opt Quant Electron.* 49 (2017) 221. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-1052-1>.
- [131] F. Costa, A. Monorchio, A Frequency Selective Radome With Wideband Absorbing Properties, *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 60 (2012) 2740–2747. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2194640>.
- [132] E. Vandelle, Exploration de solutions antennaires et de formation passive de faisceaux pour la récupération et le transfert d'énergie sans fil, (2019).
- [133] S. Kim, R. Vyas, J. Bito, K. Niotaki, A. Collado, A. Georgiadis, M.M. Tentzeris, Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensor Platforms, *Proc. IEEE*. 102 (2014) 1649–1666. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2357031>.
- [134] E. Vandelle, D.H.N. Bui, T.-P. Vuong, G. Ardila, K. Wu, S. Hemour, Harvesting Ambient RF Energy Efficiently With Optimal Angular Coverage, *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 67 (2019) 1862–1873. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2888957>.
- [135] A. Bakytbekov, Additively Manufactured Triple-Band Fractal Antenna-on-Package for Ambient RF Energy Harvesting, (2019) 3.
- [136] C. Song, Y. Huang, J. Zhou, J. Zhang, S. Yuan, P. Carter, A High-Efficiency Broadband Rectenna for Ambient Wireless Energy Harvesting, *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 63 (2015) 3486–3495. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2431719>.
- [137] Manuel d'utilisation Vermes MDS 3200+, (n.d.).
- [138] Fiche de sécurité encre Henkel 418 SS, (2014).
- [139] Manuel de référence VAL3, (n.d.).

- [140] K. Alzahrani, D. Burton, F. Lilley, M. Gdeisat, F. Bezombes, M. Qudeisat, Absolute distance measurement with micrometer accuracy using a Michelson interferometer and the iterative synthetic wavelength principle, *Opt. Express*. 20 (2012) 5658. <https://doi.org/10.1364/OE.20.005658>.
- [141] J. Jiang, Y. Ma, Path Planning Strategies to Optimize Accuracy, Quality, Build Time and Material Use in Additive Manufacturing: A Review, *Micromachines*. 11 (2020) 633. <https://doi.org/10.3390/mi11070633>.
- [142] R. Comminal, M.P. Serdeczny, D.B. Pedersen, J. Spangenberg, Numerical Modeling of the Material Deposition and Contouring Precision in Fused Deposition Modeling, (n.d.) 10.
- [143] R.K. Hoffmann, Handbook of microwave integrated circuits, Norwood, MA, Artech House, Inc., 1987, 544 p. Translation. (1987). <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987ah...book....H> (accessed March 25, 2021).
- [144] B. Wadell, Transmission line design handbook, Artech, 1991.
- [145] P.F. Combes, Micro-ondes. cours et exercices 2, 2, Dunod, Paris, 1997.
- [146] C.P. Wen, Coplanar Waveguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Nonreciprocal Gyromagnetic Device Applications, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 17 (1969) 1087–1090. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1969.1127105>.
- [147] O. Yeonjeong, J. Yunnan, A Compact Four-Port Coplanar Antenna Based on anExcitation Switching Reconfigurable Mechanism forCognitive Radio Applications, (2019).
- [148] J. Manish, A. Poonam, Design of Dual-Band Bandpass Filter on Coplanar Waveguide Using Meander Inductor, (2020) 4.
- [149] M. Horno, F.L. Mesa, F. Medina, R. Marques, Quasi-TEM analysis of multilayered, multiconductor coplanar structures with dielectric and magnetic anisotropy including substrate losses, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 38 (1990) 1059–1068. <https://doi.org/10.1109/22.57331>.
- [150] L. Zhu, Exploring Strategies for High Dielectric Constant and Low Loss Polymer Dielectrics, *J. Phys. Chem. Lett*. 5 (2014) 3677–3687. <https://doi.org/10.1021/jz501831q>.
- [151] C. Guers, Optimisation des matériaux celluloses pour des applications en radiofréquences et térahertz, (n.d.) 246.
- [152] Lacrevez, Thierry, Caractérisation hyperfréquences de matériaux isolants de haute permittivité en vue de l'intégration de fonctions passives dans les circuits intégrés avancés, 2005.
- [153] G. Boudouris, A.P. Kastler, Cavités électromagnétiques, Dunod, Paris, France, 1971.
- [154] Shihe Li, C. Akyel, R.G. Bosisio, Precise Calculations and Measurements on the Complex Dielectric Constant of Lossy Materials Using TM/sub 010/ Cavity Perturbation Techniques, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 29 (1981) 1041–1048. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1981.1130496>.
- [155] A.M. Mangan, S.P. Voinigescu, Ming-Ta Yang, M. Tazlauanu, De-embedding transmission line measurements for accurate modeling of IC designs, *IEEE Trans. Electron Devices*. 53 (2006) 235–241. <https://doi.org/10.1109/TED.2005.861726>.
- [156] T. Lacrevez, G. Houzet, C. Bermond, P. Artillan, D. Auchère, L. Schwarz, B. Fléchet, Caractérisation in-situ jusqu'à 100 GHz d'isolants utilisés dans les nouvelles technologies 3D de type « System in Package on Board » (SiPoB), (2020) 4.
- [157] G. Houzet, P. Artillan, C. Bermond, T. Lacrevez, B. Flechet, Turnkey Methodology for Characteristic Impedance Extraction of Embedded Transmission Lines, in: 2019 IEEE 23rd Workshop on Signal and Power Integrity (SPI), IEEE, Chambéry, France, 2019: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/SaPIW.2019.8781663>.

- [158] E. Masson, Etude de la propagation des ondes électromagnétiques dans les tunnels courbes de section non droite pour des applications métro et ferroviaire, (n.d.) 175.
- [159] Gardiol Fred, Electromagnétisme-Volume 3, 2004.
- [160] M. Kalin, M. Polajnar, The wetting of steel, DLC coatings, ceramics and polymers with oils and water: The importance and correlations of surface energy, surface tension, contact angle and spreading, *Applied Surface Science*. 293 (2014) 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.12.109>.
- [161] K.-Y. Bae, D.-H. Lim, J.-W. Park, H.-J. Kim, H.-M. Jeong, A. Takemura, Adhesion performance and surface characteristics of low surface energy psas fluorinated by UV polymerization, *Polym Eng Sci*. 53 (2013) 1968–1978. <https://doi.org/10.1002/pen.23437>.
- [162] D.P. Subedi, Contact Angle Measurement for The Surface Characterization of Solids, *Himalayan Physics*. 2 (2011) 1–4. <https://doi.org/10.3126/hj.v2i2.5201>.
- [163] J.N. Nine, S. Boudaud, LPWAN as Enabler for Widespread Geolocation Solutions, (2017).
- [164] H.U. Tahseen, L. Yang, X. Zhou, Design of FSS-antenna-radome system for airborne and ground applications, *IET Communications*. (2021) cmu2.12181. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12181>.
- [165] I.M. Ehrenberg, S.E. Sarma, B.-I. Wu, Fully conformal FSS via rapid 3D prototyping, in: *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, IEEE, Chicago, IL, USA, 2012*: pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/APS.2012.6348601>.
- [166] B. Gao, S. Huang, Z. Ren, Y. Chen, X. Wang, Design and Verification of an Integrated Free-Standing Thick-Screen FSS Radome, *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 17 (2018) 1630–1634. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2859232>.
- [167] H. Zhou, S. Qu, B. Lin, J. Wang, H. Ma, Z. Xu, W. Peng, P. Bai, Filter-Antenna Consisting of Conical FSS Radome and Monopole Antenna, *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 60 (2012) 3040–3045. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2194648>.
- [168] T.-H.-L. Dam, C. Delfaut, G. Houzet, T. Lacrevez, A. Niembro-Martin, N. Reverdy-Bruas, T.-P. Vuong, Printed radome for reconfigurable antenna radiation pattern in 5G applications, (2021) 2.
- [169] G. Houzet, T. Lacrevez, C. Bermond, P. Artillan, D. Auchère, L. Schwarz, B. Flechet, In-situ characterization up to 100 GHz of insulators used in new 3D “System in Package on board” (SiPoB) technologies, *Microelectronics Journal*. 108 (2021) 104990. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2021.104990>.
- [170] C.A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 3rd ed, John Wiley, Hoboken, NJ, 2005.
- [171] M.D. Janezic, J.A. Jargon, Complex permittivity determination from propagation constant measurements, *IEEE Microw. Guid. Wave Lett.* 9 (1999) 76–78. <https://doi.org/10.1109/75.755052>.

Abstract

Integration of printed electronic capabilities on 2D and 3D thermoplastics for radiofrequency implementations

Keywords: 6-axis robot, electronic printing, valve jetting, 2D and 3D objects, plastic substrates, MID

The MINT chair (innovating for molded & printed electronics) is an Excellency scientific chair supported by the Fondation Partenariale Grenoble INP and sponsored by Schneider Electric. Through MINT chair, Schneider teams up with two research laboratories, the LGP2 and the IMEP-LaHC, to develop electronic features on 3D shaped thermoplastics. The MINT chair gave rise to the thesis: « Printed integration of electronic capabilities on 2D and 3D thermoplastic for radiofrequency implementations »

This thesis goals are the implementation, characterization and optimization of the jetting impression process on 2D and 3D thermoplastic. Moreover, the performances of this process must be assessed in order to define its strengths and limits in a radiofrequency usage. Finally, the process capabilities were showcased by printing prototypes

To this end, this dissertation is split into three successive chapters. Firstly, the state of the art of the plastronic field, carried out through literature review on plastronic processes and their current implementations, is presented. Plastronic technologies are examined and a classification amongst well-known 3D additive manufacturing technologies is proposed. Prototypes made with plastronic technologies are displayed for each concerned field. Secondly, the electrical and geometric characterization as well as the implementation of the jetting process is presented. Printing parameters are studied and optimized to determine a resilient printing process and printing optimization strategies are set up. Finally, jetting process printouts radiofrequency capabilities are assessed through characterization of 2D and 3D coplanar transmission lines. 2D coplanar transmission lines are simulated and printed. The printing process is optimized by printing meshed ground planes. Coplanar lines are printed on 3D substrates having 90- and 130-degrees angles, then measured. Some radiofrequency implementations are examined: a LoRa antenna, a RFID tag and a 5G antenna radome.

Résumé

Intégration de fonctions électroniques imprimées sur des thermoplastiques 2D et 3D pour des applications radiofréquences

Mots-clefs : robot 6 axes, impression d'électronique, valve jetting, objets 2D et 3D, substrats plastiques

La Chaire MINT (innovating for molded & printed electronics) est une Chaire d'Excellence industrielle soutenue par la Fondation Partenariale Grenoble INP et ayant pour mécène Schneider Electric. Au travers de la Chaire MINT, Schneider s'engage avec deux laboratoires de recherche, le LGP2 et l'IMEP-LaHC dans le but de développer des fonctionnalités électroniques sur des thermoplastiques de forme 3D. La thèse : « Intégration de fonctions électroniques imprimées sur des thermoplastiques 2D et 3D pour des applications radiofréquences » s'inscrit dans le programme de recherche de la Chaire MINT initié en septembre 2015.

Les objectifs de cette thèse sont ainsi de développer un procédé de fabrication additive pour fonctionnaliser des thermoplastiques tridimensionnels dans le contexte de l'IoT. Les différentes phases mises en œuvre consistent à caractériser et optimiser le procédé d'impression jetting en 2D et 3D. Afin de définir les limites et les atouts de cette technologie pour des applications radiofréquences, les performances de ce procédé en radiofréquence sont également évaluées. Des dispositifs fonctionnels ont, en outre, été réalisés afin d'illustrer les potentialités du procédé.

La thèse s'articule ainsi en trois chapitres : dans un premier temps, une étude bibliographique est réalisée sur les procédés plastroniques et leurs applications. Les technologies plastroniques sont détaillées et une proposition de classification de celles-ci parmi les technologies de fabrication additives 3D maîtrisées est proposée. Des dispositifs réalisés en technologie plastroniques sont présentés pour chacun des domaines abordés. Dans un deuxième temps, le développement du procédé de jetting et sa caractérisation géométrique et électrique est présenté. Les paramètres d'impression sont étudiés et optimisés pour une impression robuste. Des stratégies d'optimisation de l'impression sont mises en place. Finalement, à travers une caractérisation de lignes de transmission coplanaires en 2D et en 3D, une évaluation des performances radiofréquences des impressions avec le procédé jetting est réalisée. Des lignes coplanaires en 2D sont simulées et imprimées. Une optimisation de l'impression est réalisée en imprimant des plans de masse maillés. Des lignes coplanaires sont également imprimées sur des substrats 3D comportant des angles à 90° et à 130°, puis mesurées. Des applications radiofréquences sont ensuite détaillées sur des substrats 2D et 3D tels qu'une antenne LoRa, un tag RFID et un radôme pour antenne 5G montrant le potentiel d'applications de la technologie développée.