



CIRCUITS MULTICOUCHES IMPRIMÉS PAR SÉRIGRAPHIE À BASE DE CUIVRE POUR L'ÉLECTRONIQUE HYBRIDE FLEXIBLE

RAPPORT TECHNIQUE COMPLET SUR LA FABRICATION ADDITIVE POUR
LES SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES DE NOUVELLE GÉNÉRATION

NOMAD Lab, École de Technologie Supérieure, Montréal, QC, Canada

AC. Angel-Ospina, JA. Benavides-Guerrero, LF. Gerlein, K. Shah, SG. Cloutier

C2MI, Centre de Collaboration MiQro Innovation, Bromont, QC, Canada

C. Sansregret, MJ. Turgeon



La fabrication de circuits électroniques a été dominée pendant plus de 60 ans par des procédés de fabrication soustractive, utilisant des techniques photolithographiques et de gravure chimique pour créer des chemins conducteurs sur des substrats rigides. Ces méthodes traditionnelles, bien qu'efficaces pour les applications haute performance, génèrent des déchets environnementaux considérables et s'appuient sur des procédés chimiques toxiques qui deviennent de plus en plus problématiques dans le paysage manufacturier actuel axé sur la durabilité (voir Figure 1).

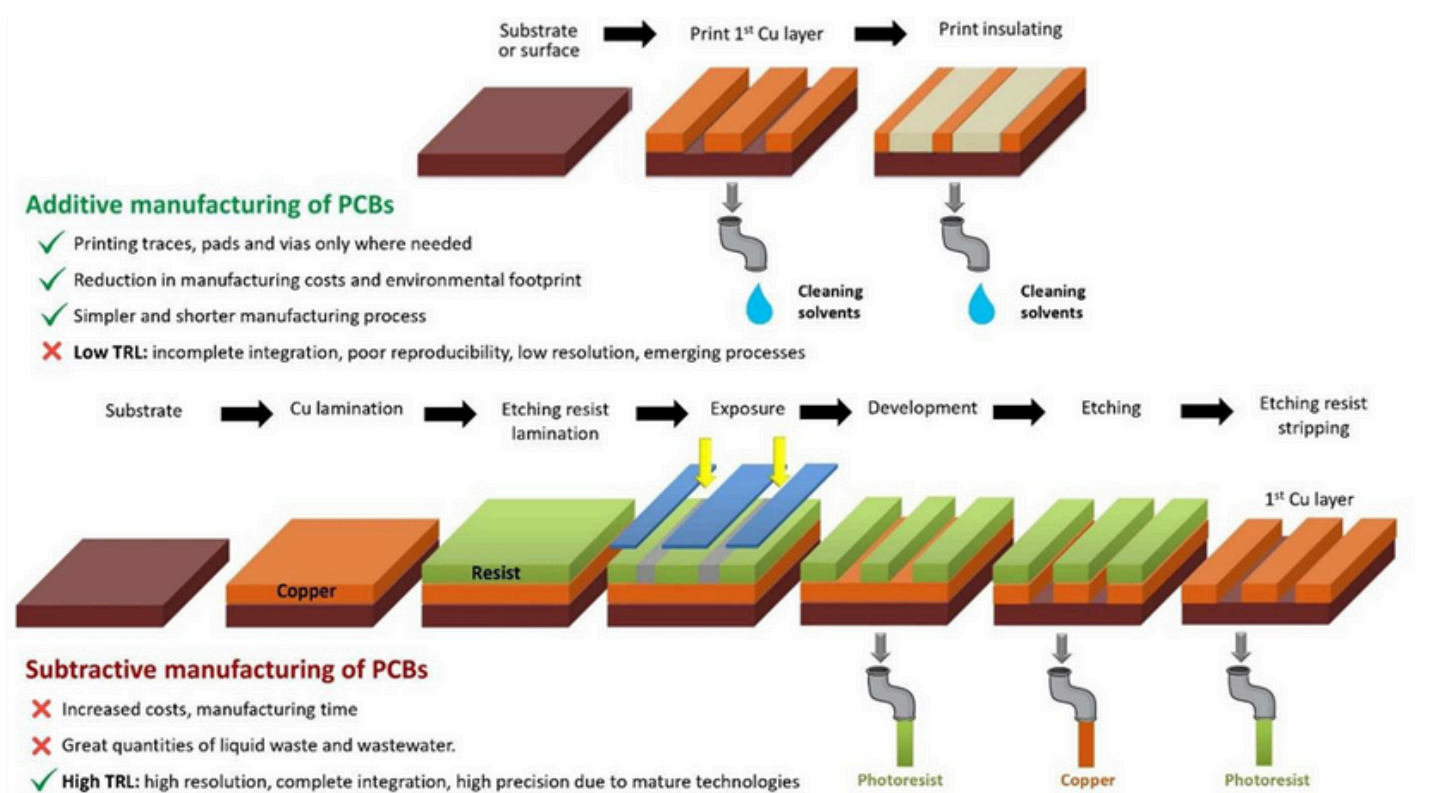


Figure 1. Comparaison entre la fabrication additive et la fabrication soustractive de PCB.

Les circuits multicouches en cuivre sérigraphiés pour l'électronique hybride flexible (EHF) offrent une alternative transformatrice à la fabrication électronique en exploitant des techniques additives pour déposer des matériaux conducteurs couche par couche (1). Les systèmes EHF intègrent de manière unique des interconnexions conductrices imprimées, des substrats flexibles ou étirables, et des composants montés en surface, permettant la création de dispositifs qui sont simultanément légers, mécaniquement souples et fonctionnellement robustes. Ces systèmes peuvent soutenir des déformations mécaniques telles que la flexion et l'étirement sans compromettre les performances électriques.

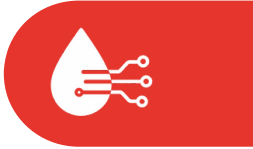


Permettant un prototypage rapide, les circuits EHF sérigraphiés peuvent également répondre aux demandes critiques pour une fabrication durable, rentable et respectueuse de l'environnement. Leur polyvalence permet d'aborder de nouveaux domaines d'application, particulièrement dans les secteurs de la santé, de l'électronique grand public, de l'automobile et de l'Internet des objets (IoT), qui sont inaccessibles avec l'électronique rigide conventionnelle (2,3). Cette approche combine des caractéristiques uniques telles que des facteurs de forme ultra-minces, flexibles et conformes ; la compatibilité avec une large gamme de substrats incluant les polymères, les textiles et le papier ; des flux de fabrication simplifiés ; et une production de masse évolutive et rentable. Collectivement, ces attributs positionnent l'EHF comme une plateforme transformatrice pour les systèmes électroniques de nouvelle génération dans diverses industries.

Un effort de recherche collaboratif entre le laboratoire NOMAD de l'École de technologie supérieure (ÉTS) et le Centre de Collaboration MiQro Innovation (C2MI) a établi que les circuits en cuivre sérigraphiés peuvent atteindre des performances comparables au cuivre massif, avec une excellente adhésion selon les normes ISO/ASTM (4). Pour valider la fiabilité à long terme, nous avons effectué des tests JEDEC JESD22-A101 (5) sur des circuits monocouches, dans lesquels les échantillons ont été soumis à 85 °C et 85% d'humidité pendant 1000 heures tout en restant opérationnels. Nos circuits monocouches ont réussi ce test sans qu'une seule unité ne tombe en panne. L'évaluation des circuits bicouches est encore en cours, mais les résultats sont jusqu'à présent prometteurs. Les résultats favorables, combinés aux projections du marché selon lesquelles le secteur de l'EHF atteindra 54,07 milliards de dollars d'ici 2030 avec un TCAC de 10,5% de 2023 à 2030, soulignent à la fois la robustesse et le fort potentiel commercial de cette technologie (6).

De plus, les configurations hybrides qui intègrent des composants électroniques rigides conventionnels avec des circuits imprimés offrent la solution la plus pratique pour un déploiement à court terme (7). Ces systèmes hybrides capitalisent sur les capacités haute performance de l'électronique traditionnelle pour des tâches telles que le traitement de signal complexe, tout en employant des composants imprimés tels que des capteurs, des actionneurs, des antennes et des interconnexions sur des substrats flexibles pour permettre des facteurs de forme légers, adaptables et rentables.

Ce rapport technique fournit une analyse complète de la technologie des circuits multicouches en cuivre sérigraphiés, examinant les capacités actuelles, les applications de marché, les défis techniques et les orientations de développement futur. L'investigation s'appuie sur nos résultats de recherche approfondis, l'analyse industrielle et la validation expérimentale pour présenter une évaluation en profondeur de cette approche de fabrication transformatrice.



1. CIRCUITS MULTICOUCHES EN CUIVRE SÉRIGRAPHIÉS - APPLICATIONS

La fabrication électronique traditionnelle a longtemps été contrainte par les substrats rigides et les procédés de fabrication soustractive. En contraste, les circuits multicouches en cuivre sérigraphiés pour les EHF représentent une technologie complémentaire qui ouvre des domaines d'application entièrement nouveaux, plutôt que de servir simplement comme substitut aux solutions existantes. Ces systèmes offrent des avantages significatifs en termes de rentabilité, de flexibilité mécanique et de durabilité environnementale, les positionnant comme un catalyseur transformateur pour les applications électroniques de nouvelle génération.

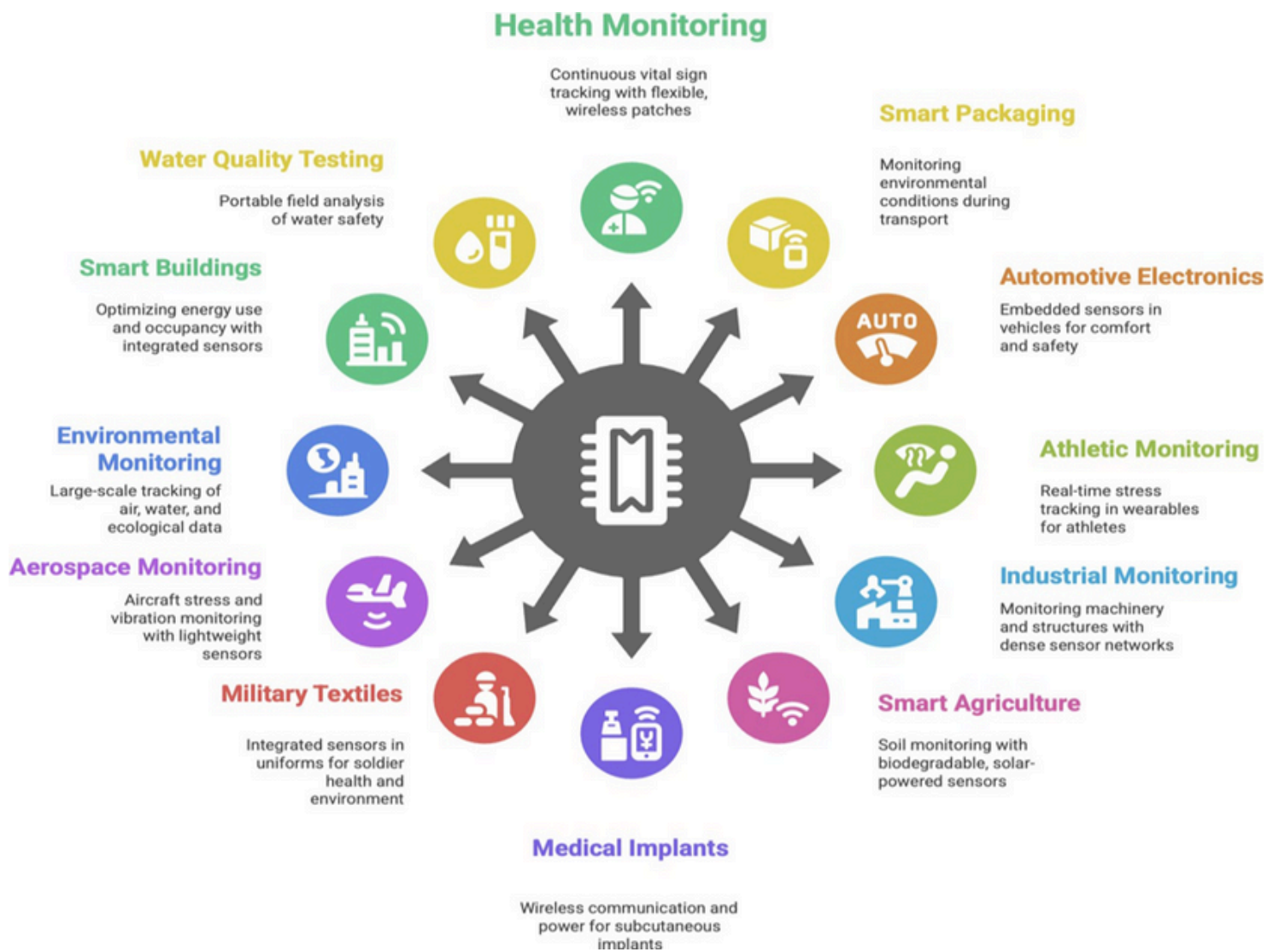


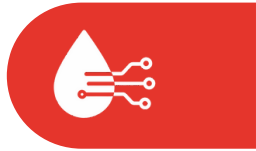
Figure 2. Applications des EHF



Les technologies émergentes d'électronique imprimée ouvrent de nouveaux horizons en intégrant de manière transparente des circuits flexibles multicouches avec des capteurs, des systèmes d'alimentation et des modules de communication sans fil (voir Figure 2). Dans le secteur de la santé, les patches de surveillance conformes à la peau et les interfaces d'implants biocompatibles permettent un suivi continu des signes vitaux et une transmission de données sans fil, améliorant le confort du patient tout en minimisant l'invasivité. Pendant ce temps, les dispositifs portables athlétiques et militaires exploitent la détection physiologique et environnementale en temps réel pour améliorer les performances, la conscience situationnelle et la sécurité. Les textiles intelligents exploitent davantage les avantages de la flexibilité pour offrir une fonctionnalité robuste dans des environnements dynamiques, contraints en espace ou mobiles. Ces applications mettent en évidence l'adaptabilité et la capacité de mise à l'échelle de l'électronique imprimée pour permettre une surveillance intelligente et en temps réel dans un large éventail de cas d'utilisation (2). Toutes ces applications démontrent plusieurs avantages clés des circuits multicouches en cuivre sérigraphiés :

- **Innovation du facteur de forme** : La capacité de créer des systèmes électroniques ultra-minces, flexibles et conformes permet l'intégration dans des emplacements et applications précédemment impossibles. L'électronique rigide traditionnelle ne peut atteindre les propriétés mécaniques requises pour ces implémentations.
- **Intégration d'impression directe** : L'impression peut être effectuée directement sur la surface d'un dispositif ou d'une structure fonctionnelle sans nécessiter un substrat séparé. Cette approche élimine les étapes de traitement supplémentaires, simplifie la fabrication et réduit les coûts globaux.
- **Déploiement rentable** : Les procédés de fabrication additive réduisent les déchets de matériaux jusqu'à 90% par rapport aux méthodes soustractives traditionnelles (8), rendant le déploiement à grande échelle économiquement viable pour des applications précédemment contraintes par des considérations de coût.
- **Durabilité environnementale** : L'élimination des procédés chimiques toxiques et le potentiel pour des substrats biodégradables répondent aux préoccupations environnementales croissantes dans la fabrication et le déploiement d'électronique.
- **Personnalisation rapide** : Les procédés d'impression numérique permettent un prototypage rapide et une personnalisation sans nécessiter des changements d'outillage coûteux, facilitant l'optimisation spécifique aux applications et un délai de mise sur le marché plus rapide.
- **Intelligence distribuée** : Les conceptions de circuits multicouches permettent le traitement local de signaux et la communication sans fil, réduisant le besoin d'infrastructure centralisée de collecte de données et permettant un comportement système plus réactif.

Ces applications représentent un changement fondamental par rapport aux modèles de déploiement électronique traditionnels, permettant l'intégration omniprésente de fonctionnalités électroniques dans les objets et environnements du quotidien. La combinaison unique de performance, rentabilité et durabilité environnementale de cette technologie la positionne comme un catalyseur clé pour la prochaine génération de systèmes électroniques.



2. CIRCUITS MULTICOUCHES EN CUIVRE SÉRIGRAPHIÉS – APERÇU TECHNIQUE

2.1 Procédé de fabrication

La fabrication additive de circuits multicouches à base de cuivre sérigraphiés représente un écart fondamental par rapport à la fabrication électronique traditionnelle. Alors que l'électronique conventionnelle nécessite des procédés de gravure chimique extensifs impliquant de multiples étapes de masquage, d'exposition et de retrait, les circuits sérigraphiés utilisent une approche additive simple qui dépose le matériau conducteur couche par couche. La sérigraphie utilise un écran maillé avec un pochoir à motifs pour contrôler le dépôt d'encre. Le procédé de bout en bout implique les étapes suivantes :

- Préparation du maillage avec un comptage approprié selon la rhéologie de l'encre.
- Création du pochoir en utilisant des techniques photolithographiques.
- Alignement couche par couche pour les structures multicouches.
- Application d'encre et transfert à base de raclette.
- Distance de décollement contrôlée pour une qualité d'impression optimale.
- Séchage, durcissement et frittage des couches imprimées.

De plus, pour l'étape d'assemblage :

- Préparation du pochoir pour le dépôt de pâte à souder.
- Placement des composants et soudage par refusion.

La sérigraphie offre une excellente compatibilité des matériaux, une capacité de débit élevée et un contrôle de procédé établi. Cependant, elle nécessite des écrans/pochoirs dédiés pour chaque couche et conception, limitant la flexibilité pour le prototypage rapide ou la production de petits volumes (9). Malgré cette limitation, la sérigraphie reste hautement compatible avec la montée en échelle industrielle, car les paramètres de procédé et les formulations d'encre peuvent être facilement transférés à l'impression flexographique et à la fabrication rouleau à rouleau, permettant une production continue et à haut débit de circuits multicouches. La figure 3 montre un diagramme de flux étape par étape du procédé.

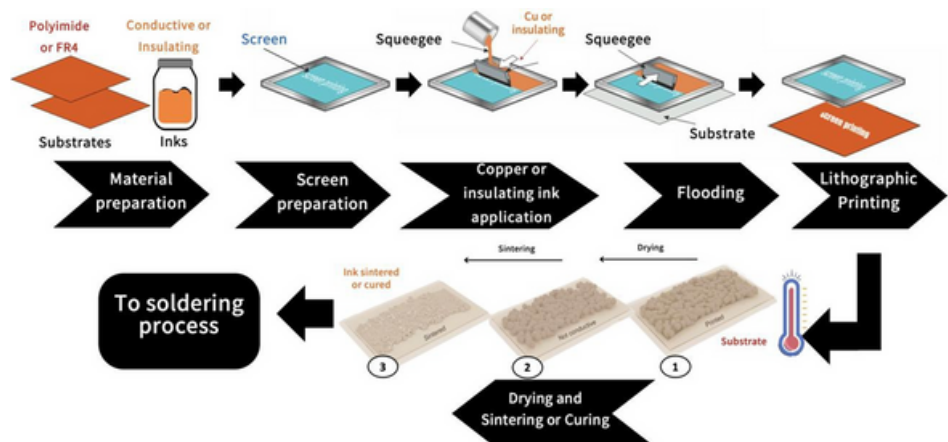


Figure 3. Étapes du processus de sérigraphie de EHF.



Notre processus de fabrication comprend les étapes suivantes :

Préparation des matériaux : Le processus de fabrication commence par la préparation du substrat, des encres conductrices à base de cuivre et des matériaux isolants. Les substrats couramment utilisés dans nos échantillons, sans s'y limiter, comprennent le polyimide, le FR4 et le polyéthylène téréphtalate (PET), fournis par des fabricants tels que Panasonic, Normandy Coating, DuPont et Polyonics (10). Le substrat sélectionné, qu'il s'agisse de polyimide, de FR4 ou d'autres polymères flexibles, est soigneusement nettoyé et conditionné afin d'assurer une adhésion et une qualité d'impression optimales lors des étapes de traitement ultérieures.

Polyimide (PI) : Le substrat privilégié pour les applications hautes performances en raison de son excellente stabilité thermique et de ses propriétés mécaniques :

- Température de transition vitreuse $>300^{\circ}\text{C}$.
- Excellente résistance chimique.
- Résistance mécanique et flexibilité supérieures.
- Compatibilité avec les processus de frittage à haute température.

FR4 (Flame Retardant 4) : Une option de substrat économique adaptée aux applications de performance modérée :

- Compatibilité standard avec les processus de fabrication existants.
- Bonnes propriétés mécaniques et stabilité dimensionnelle.
- Coût inférieur par rapport aux substrats flexibles spécialisés.
- Stabilité thermique adéquate pour la plupart des processus de frittage d'encre de cuivre.

Préparation et alignement des écrans : Des écrans de précision sont préparés à l'aide de techniques photolithographiques pour créer les motifs de circuits souhaités. Des procédures d'alignement critiques garantissent un repérage correct entre les couches, avec des exigences de précision variant selon l'application et la complexité de la conception. Les systèmes de production avancés intègrent une correction d'alignement en temps réel et une surveillance de la qualité pour assurer une construction multicouche fiable. La figure 4 montre le processus de préparation des écrans, qui déterminera la résolution finale et la qualité des circuits imprimés.

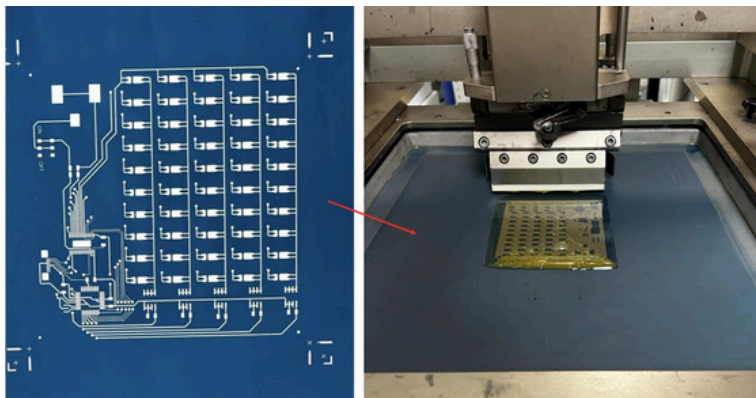


Figure 4. Conception du motif d'écran et impression.



Dépôt et adhésion de l'encre : La fabrication de circuits multicouches en cuivre imprimés repose sur la formulation de l'encre, le contrôle précis des matériaux et les techniques de dépôt pour obtenir des composants électroniques flexibles hautes performances. Le processus de sérigraphie consiste à transférer l'encre à base de cuivre à travers un treillis à motifs à l'aide d'une raclette sous pression et vitesse contrôlées. Ces paramètres sont soigneusement optimisés pour assurer une couverture d'encre uniforme et des largeurs de ligne constantes. Les couches successives sont imprimées avec un alignement précis pour empiler des architectures multicouches fiables, permettant des conceptions de circuits compacts et complexes sur des substrats flexibles.

Encres conductrices à base de cuivre : Le cuivre se distingue comme le matériau le plus prometteur pour les traces conductrices imprimées, offrant un équilibre entre d'excellentes performances électriques et des avantages de coût significatifs par rapport aux métaux précieux. Parmi les fournisseurs d'encre courants pour EHF figurent ACI Materials, Celanese, Copprint, Creative Materials, Elantas, Henkel, Heraeus, Novacentrix et VFP (10). Nos recherches ont démontré que des encres de cuivre correctement formulées peuvent atteindre des conductivités proches de celles du cuivre massif, selon la structure des particules et la formulation. Les caractéristiques clés des encres de cuivre comprennent (11) :

- Taille des particules allant des nanoparticules (<1µm) aux microparticules (1-10µm).
- Teneur en cuivre typiquement de 65 à 75 % en poids.
- Propriétés rhéologiques adaptées à la sérigraphie (viscosité 50–150 Pa·s).
- Profils de frittage en température adaptés aux substrats flexibles.

Additifs d'encre et optimisation des performances : Pour améliorer la stabilité de l'encre et les performances d'impression, les formulations avancées intègrent une gamme d'additifs fonctionnels :

- Agents antimousse pour éliminer les bulles d'air pendant l'impression.
- Modificateurs de tension superficielle pour une répartition uniforme de l'encre.
- Antioxydants pour prévenir l'oxydation du cuivre pendant le stockage et le traitement.
- Contrôle de la distribution granulométrique pour un empilement et une conductivité optimale.

Matériaux conducteurs alternatifs : Bien que le cuivre offre un équilibre optimal entre performance et coût, des matériaux alternatifs sont utilisés pour des applications spécialisées (12,13) :

- Encres d'argent pour les applications nécessitant une conductivité maximale.
- Encres à base de carbone pour les applications sensibles aux coûts.
- Formulations hybrides combinant plusieurs agents conducteurs pour des propriétés sur mesure.

Encres diélectriques : Les circuits multicouches nécessitent une isolation électrique efficace entre les couches conductrices (14). Les matériaux diélectriques doivent fournir :

- Une tension de claquage élevée (généralement >1kV pour l'électronique imprimée).
- Une constante diélectrique faible pour les applications haute fréquence.
- Une compatibilité thermique avec les processus de frittage d'encre de cuivre.
- Une flexibilité mécanique pour s'adapter à la flexion et à la contrainte du substrat.

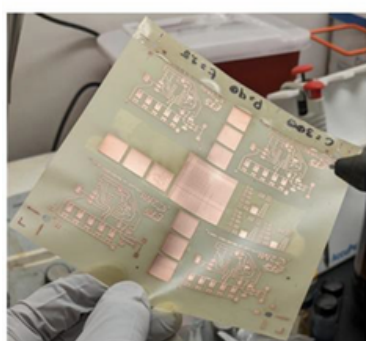


Sélection des matériaux diélectriques : Les couches diélectriques sont obtenues à l'aide de diverses approches :

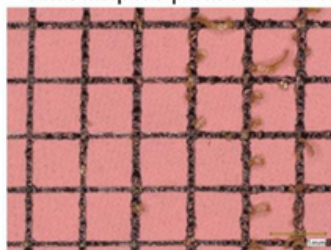
- Diélectriques polymères imprimés compatibles avec le traitement additif.
- Films laminés appliqués entre les couches imprimées.
- Encres durcissables aux UV permettant un modelage précis, un durcissement rapide et à basse température.
- Composites organiques-inorganiques hybrides offrant des performances mécaniques et électriques supérieures.

Tests d'adhésion et contrôle qualité : Pour garantir une adhésion robuste entre les couches, en particulier pour les traces de cuivre, un test d'adhésion par quadrillage normalisé est effectué (4). Cette méthode évalue l'adhésion de l'encre au substrat et entre les couches imprimées, fournissant une référence pour la fiabilité du processus (voir Figure 5).

SUBSTRATE ADHESION: ASTM D3359 - cross-hatch → polyester tape + scotch tape peel test



- 3M 600 tape - Adhesion: 16 oz/in
- Polyester/Rope-Fiber Laminate Tape (LA-26) – Adhesion: 60 oz/in
- All samples passed with class 5B (0%) – 4B (<5%)



ISO Class: 0/ASTM Class: 5B The edges of the cuts are completely smooth; none of the squares of the lattice is detached.	
ISO Class: 1/ASTM Class: 4B Detachment of small flakes of the coating at the intersections of the cuts. A cross-cut area not significantly greater than 5% is affected.	

Figure 5. Test d'adhésion par quadrillage sur cuivre imprimé par sérigraphie.

Démonstrateur : cuivre imprimé sur FR4.

Durcissement et frittage : Après l'impression, l'encre de cuivre déposée subit un traitement thermique ou photonique pour atteindre ses propriétés électriques et mécaniques finales. Les conditions de post-traitement, en particulier la température, dépendent à la fois de la formulation de l'encre et de la tolérance thermique du substrat. Cette étape élimine les solvants résiduels et favorise la coalescence des particules, formant des voies métalliques continues au sein de la couche imprimée.

La figure 6 présente une comparaison de deux approches de frittage thermique basées sur la résistance par carré (Rsh en Ω/\square), où la méthode A a une température de frittage inférieure à la méthode B ($T_A < T_B$). Ces méthodes ont été appliquées à des traces de cuivre imprimées sur des substrats de polyimide (en haut) et de FR4 (en bas). Les valeurs de Rsh ont été mesurées à l'aide d'une méthode à quatre pointes pour évaluer quantitativement la conductivité électrique des traces de cuivre imprimées sous des conditions de frittage variables et sur différents matériaux de substrat. Les résultats indiquent que Rsh varie en fonction du type de substrat et de la température de frittage, avec des valeurs plus faibles observées sur les substrats de polyimide par rapport au FR4. Les circuits flexibles imprimés ont atteint une résistance par carré minimale qui est environ 3,6 fois supérieure à celle du cuivre massif.

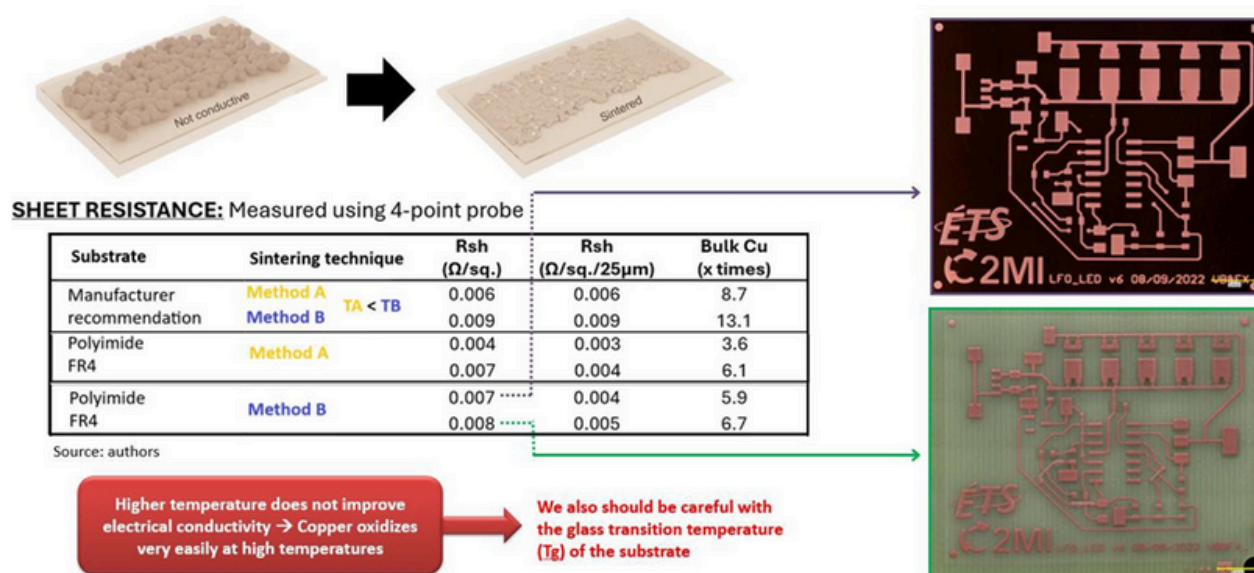


Figure 6. Résistance par carré à différentes températures comparée à celle du cuivre massif pour les substrats PI et FR4.

Intégration des processus et assemblage multicouche : Une mise en œuvre réussie nécessite une intégration minutieuse de multiples processus d'impression avec un alignement cohérent, une compatibilité des matériaux et une fixation des composants. L'architecture d'empilement multicouche se compose généralement de :

- Couche inférieure de cuivre (L1) pour les voies conductrices principales et l'intégration des composants.
- Couche d'isolation diélectrique pour l'isolation électrique.
- Couche supérieure de cuivre (L2) pour le routage secondaire.
- Interconnexions par vias assurant les connexions verticales entre les couches.
- Pâtes à souder pour le placement des composants.

Les interconnexions par vias entre L1 et L2 sont réalisées en utilisant uniquement une approche additive, fortement influencée par l'alignement des écrans pour L1 et L2. Pour le processus de soudure, nous avons utilisé une soudure à basse température à base de Sn-Bi et un pochoir. La figure 7 illustre le processus de fixation des composants, détaillant les étapes impliquées dans le dépôt au pochoir et la soudure par refusion pour un assemblage sûr et répétable.

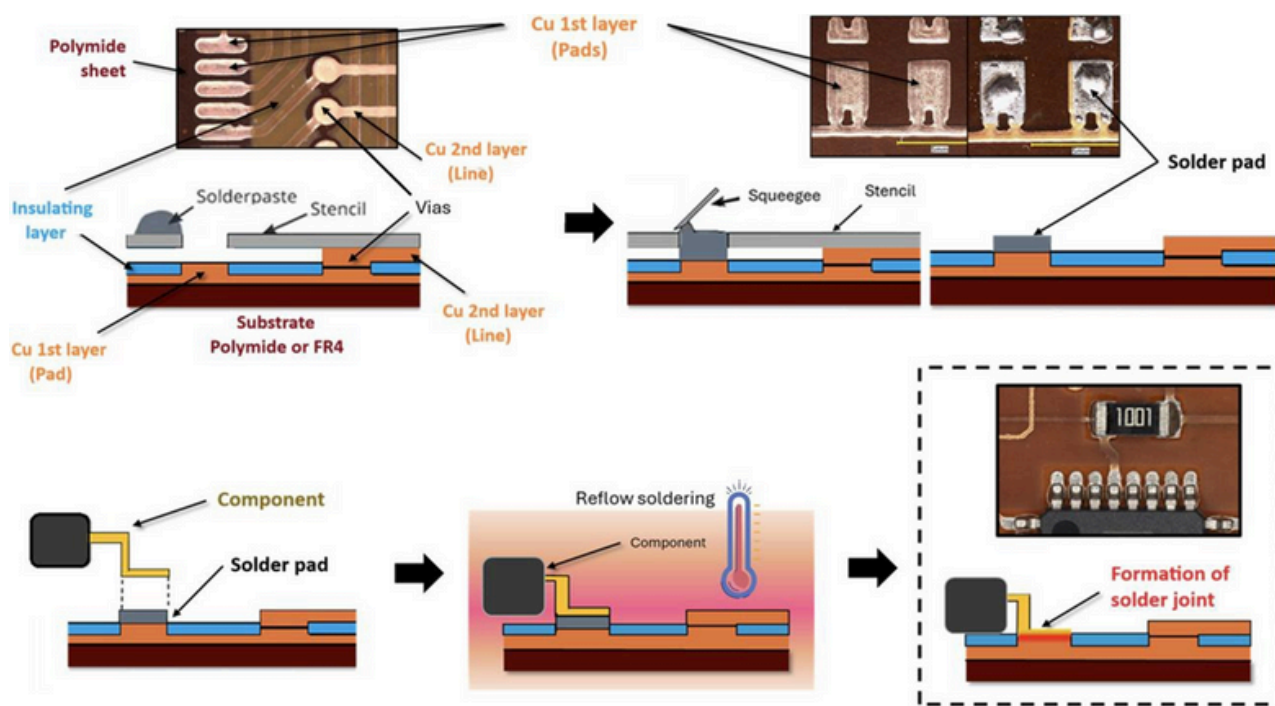


Figure 7. Processus de soudure sur sérigraphie de EHF.

Fiabilité des joints de soudure et caractérisation de l'assemblage : La fiabilité du joint de soudure entre les composants et les traces de cuivre imprimées est régie par plusieurs paramètres critiques, notamment la rugosité de surface et l'énergie de surface de la couche de cuivre, ainsi que les propriétés de mouillage de la pâte à souder. Ces facteurs jouent un rôle clé pour assurer une adhésion mécanique solide et un contact électrique constant.

Les EHF intègrent des composants électroniques conventionnels, tels que des circuits intégrés en silicium et des éléments passifs comme des résistances. Pour améliorer la flexibilité mécanique et réduire le facteur de forme global, des puces de silicium amincies sont fréquemment utilisées. Ces composants sont assemblés sur les traces conductrices imprimées, établissant l'architecture hybride caractéristique des systèmes EHF. Pour garantir la robustesse environnementale et la stabilité mécanique, les composants sont généralement encapsulés avec des matériaux protecteurs, tels que des résines époxy, des silicones ou des polyimides, qui les protègent de la corrosion et des contaminants tout en renforçant l'adhésion et la durabilité sous contrainte de flexion.

Nos circuits sont compatibles avec les techniques de fixation conventionnelles et les composants rigides. La figure 8 illustre le processus de placement des composants à l'aide d'un système de pick-and-place, suivi d'une caractérisation détaillée des joints par imagerie par rayons X et microscopie optique. Cette analyse fournit un aperçu de la morphologie et de la couverture de la pâte à souder au-dessus du cuivre imprimé après le processus de refusion, permettant l'évaluation de l'intégrité des joints et la cohérence du processus.

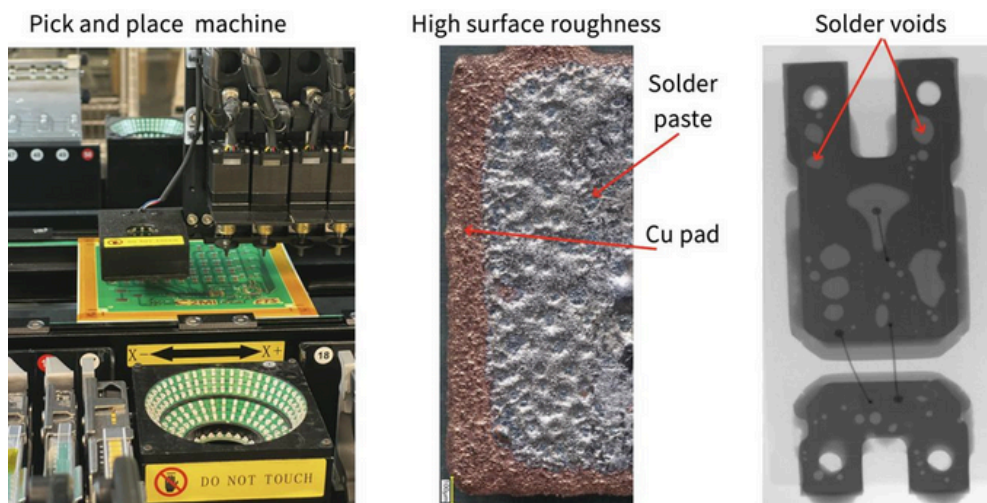


Figure 8. Placement des composants par pick-and-place et analyse de soudure.

La qualité du joint de soudure est un facteur critique pour assurer la résistance mécanique et la fiabilité électrique. Pendant la refusion, des caractéristiques telles que l'activité du flux, le piégeage d'air ou la formation d'oxyde de cuivre peuvent influencer la formation de vides à l'intérieur de la soudure. Ces phénomènes sont communs aux assemblages en cuivre imprimés et conventionnels. Avec un contrôle de processus approprié et des profils de soudure optimisés, les vides peuvent être efficacement minimisés, ce qui permet d'obtenir des joints robustes qui offrent des performances constantes et une durabilité à long terme.

3. PERMETTRE LA FABRICATION ADDITIVE

L'approche de sérigraphie additive offre des avantages clés par rapport aux méthodes soustractives traditionnelles, notamment une meilleure utilisation des matériaux, une complexité de processus réduite, une durabilité environnementale améliorée et une plus grande flexibilité de conception. Ces avantages soutiennent collectivement une fabrication électronique plus rapide, plus propre et plus adaptable. La figure 9 présente le circuit multicouche final imprimé par sérigraphie, démontrant une intégration réussie des composants et une fonctionnalité par le biais d'un réseau de DEL fonctionnel.

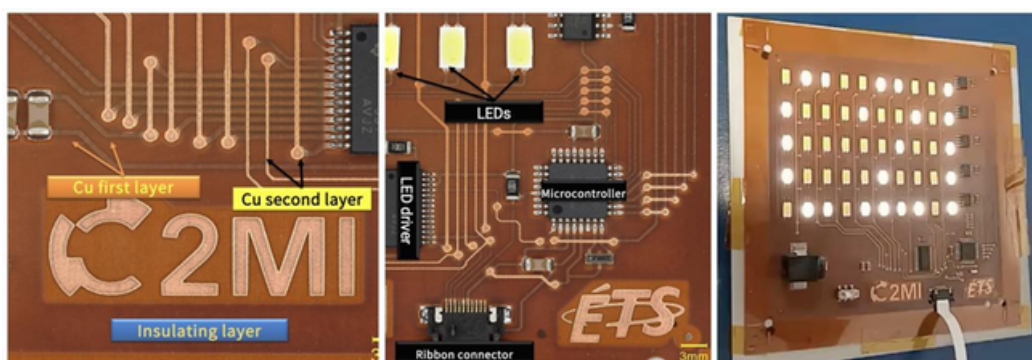


Figure 9. Circuit multicouche en cuivre imprimé par sérigraphie entièrement assemblé et opérationnel.



3.1 Avantages et inconvénients

L'évaluation des circuits multicouches en cuivre imprimés par sérigraphie nécessite une considération équilibrée de leurs avantages et de leurs limites par rapport aux approches de fabrication de PCB traditionnelles. La compréhension de ces compromis est essentielle pour une sélection technologique appropriée et une conception d'application adaptée.

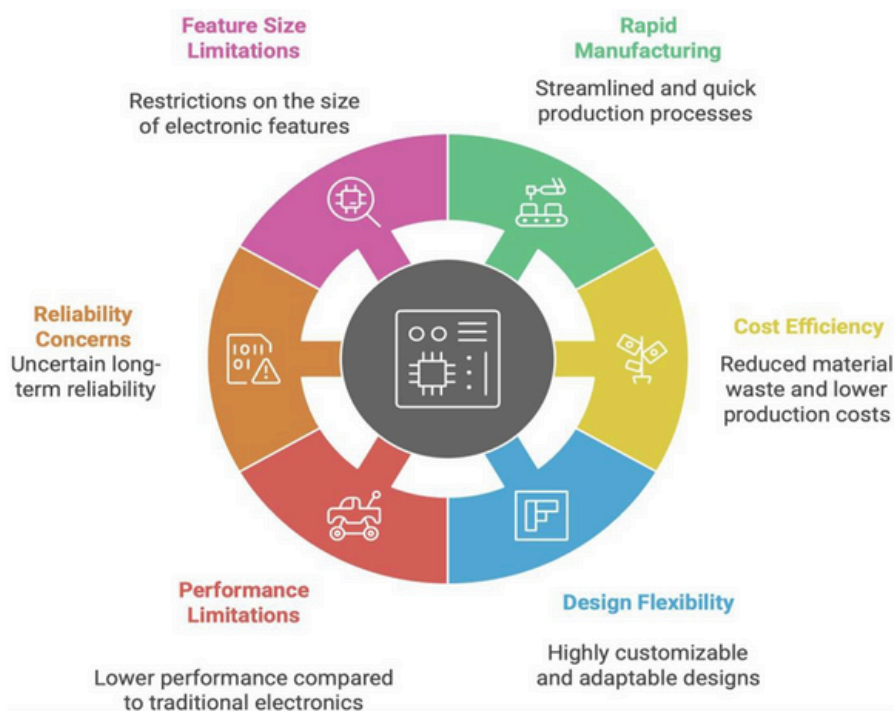
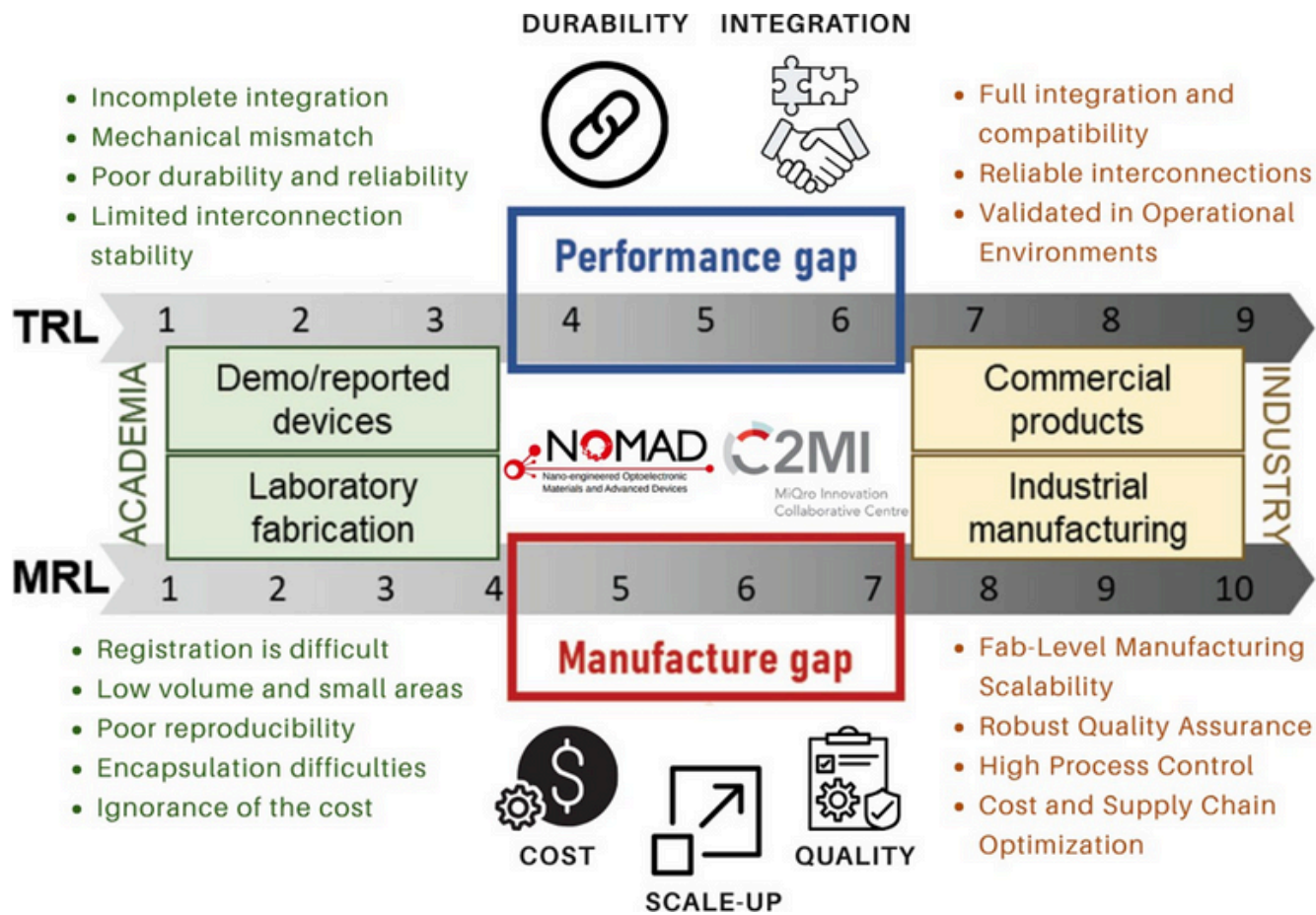


Figure 10. Avantages et inconvénients des circuits multicouches en cuivre imprimés par sérigraphie pour la fabrication de EHF.

Bien que les circuits multicouches en cuivre imprimés par sérigraphie offrent de nombreux avantages, plusieurs défis techniques doivent être relevés pour réaliser pleinement leur potentiel.

- **Limitations de performance** : Les traces de cuivre imprimées présentent intrinsèquement une résistance électrique plus élevée que celles produites par les processus de PCB conventionnels avec du cuivre massif. De plus, les résolutions d'impression actuelles limitent la densité des interconnexions et restreignent la complexité des conceptions de circuits.
- **Contrôle du processus** : Assurer des performances constantes sur des impressions de grande surface et sur plusieurs cycles de production nécessite un contrôle de processus avancé. Des variables clés telles que la viscosité de l'encre, la pression d'impression, l'alignement des écrans et les profils de frittage doivent être gérées avec précision pour maintenir la reproductibilité et la fiabilité.
- **Opportunités d'intégration** : À court terme, les systèmes hybrides qui combinent des interconnexions imprimées avec des composants conventionnels offrent la voie de mise en œuvre la plus pratique. Cependant, la vision à long terme implique l'impression à la fois des traces conductrices et des composants fonctionnels par le biais de techniques de fabrication additive complémentaires.



Pour faire progresser cette vision, le C2MI et le laboratoire NOMAD collaborent pour élever le niveau de maturité technologique (TRL) et le niveau de maturité de fabrication (MRL) des circuits multicouches en cuivre imprimés par sérigraphie. Cet effort conjoint vise à établir une plateforme robuste et évolutive pour les EHF en intégrant le cuivre imprimé, les composants passifs et les dispositifs montés en surface dans une solution unifiée et fabricable, offrant de nouveaux niveaux de liberté de conception et d'efficacité de production.



4. CONCLUSION

Les circuits multicouches en cuivre imprimés par sérigraphie pour l'électronique hybride flexible (EHF) représentent un changement de paradigme dans la fabrication électronique, offrant une alternative durable, économique et polyvalente aux systèmes rigides traditionnels. Les recherches conjointes menées par le laboratoire NOMAD à l'ÉTS et C2MI ont démontré la viabilité technique de cette approche, atteignant des jalons clés en matière de conductivité électrique, de fiabilité mécanique, de précision d'alignement multicouche et d'intégration de composants. Ces développements confirment que les circuits en cuivre imprimés par sérigraphie peuvent répondre aux exigences fonctionnelles des applications EHF commerciales tout en soutenant les demandes de secteurs émergents tels que les dispositifs portables, les capteurs médicaux et les systèmes IoT.


Pour l'avenir, les progrès continus dépendront de l'optimisation des formulations de matériaux, de l'évaluation de la fiabilité des circuits, du raffinement du contrôle des processus pour permettre une fabrication évolutive, et de l'établissement de stratégies robustes pour l'intégration hybride. Les travaux de NOMAD et C2MI fournissent une base critique pour ces efforts, les positionnant à l'avant-garde de l'innovation dans ce domaine. Nous visons à ce que les circuits multicouches en cuivre imprimés par sérigraphie soient aussi fiables que leurs homologues PCB pour les applications ciblées. Les organisations cherchant à tirer parti de cette technologie devraient cibler des applications qui exploitent des attributs uniques tels que la flexibilité, la construction légère et l'impact environnemental réduit, plutôt que de tenter de remplacer l'électronique conventionnelle dans toutes les applications. En adoptant ces forces et en investissant dans le développement collaboratif, les parties prenantes peuvent stimuler la transition vers une industrie électronique plus durable et adaptable.





1. Dong Y, Bao C, Kim WS. Sustainable Additive Manufacturing of Printed Circuit Boards. *Joule*. 2018 Apr;2(4):579–82.
2. Wang Y, Xu C, Yu X, Zhang H, Han M. Multilayer flexible electronics: Manufacturing approaches and applications. *Mater Today Phys*. 2022 Mar;23:100647.
3. Matsui H, Takeda Y, Tokito S. Flexible and printed organic transistors: From materials to integrated circuits. *Org Electron*. 2019 Dec;75:105432.
4. ASTM. ASTM D3359-23: Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test [Internet]. 2023. Available from: <https://store.astm.org/d3359-23.html>
5. C2MI. Jedec THB specifications JESD22-A101: Temperature/Humidity chambers [Internet]. 2025. Available from: <https://www.c2mi.ca/en/equipement/temperaturehumidity-chambers/>
6. Grand View Research [Internet]. 2024. Flexible Electronics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component, By Application (Consumer Electronics, Automotive, Healthcare, Industrial), By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030. Available from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/flexible-electronics-market>
7. IDTechEx. Flexible Hybrid Electronics 2024-2034 [Internet]. 2025. Available from: <https://www.idtechex.com/en/research-report/flexible-hybrid-electronics/950>
8. allpcb.com. AllElectroHub. 2025. PCB Manufacturing: Eco-Design for Flexible PCBs - Balancing Performance and Sustainability. Available from: <https://www.allpcb.com/fr-FR/blog/pcb-manufacturing/eco-design-for-flexible-pcbs-balancing-performance-and-sustainability.html>
9. Shang J, Mohammadi M, Strandberg J, Petsagkourakis I, Åhlin J, Hagel O, et al. Fully screen printed stretchable liquid metal multilayer circuits using green solvents and scalable water-spray sintering. *Npj Flex Electron*. 2025 Mar 5;9(1):19.
10. Franz J. What are Flexible Hybrid Electronics (FHE)? [Internet]. 2025. Available from: https://www.voltera.io/blog/flexible-hybrid-electronics?srsltid=AfmBOopVSpSZVEc9X4Y896hKPJ4tF-s5pdVYSWe8pNJm1gGfjLO_fi75
11. Zeng X, He P, Hu M, Zhao W, Chen H, Liu L, et al. Copper inks for printed electronics: a review. *Nanoscale*. 2022;14(43):16003–32.
12. Eshkeiti A, Reddy ASG, Emamian S, Narakathu BB, Joyce M, Joyce M, et al. Screen Printing of Multilayered Hybrid Printed Circuit Boards on Different Substrates. *IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol*. 2015 Mar;5(3):415–21.
13. Htwe YZN, Mariatti M. Printed graphene and hybrid conductive inks for flexible, stretchable, and wearable electronics: Progress, opportunities, and challenges. *J Sci Adv Mater Devices*. 2022 June;7(2):100435.
14. Hussain M, Zahra H, Abbas SM, Zhu Y. Flexible Dielectric Materials: Potential and Applications in Antennas and RF Sensors. *Adv Electron Mater*. 2024 Nov;10(11):2400240.


CONTACTEZ NOS EXPERTS

 450-534-8000

 expertise@c2mi.ca



45, boulevard de l'Aéroport
Bromont, QC, Canada, J2L 1S8

 450-534-8000

 info@c2mi.ca