

# La chaîne numérique au service de la conception et la validation des cartes de circuits imprimés

F.TAGNON<sup>a</sup>, C. CZARNOTA<sup>a\*</sup>, S. MERCIER<sup>a</sup>, M. MARTINY<sup>a</sup>,  
L. BODIN<sup>b</sup>

- a. Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3),  
CNRS UMR7239, Université de Lorraine, Ile du Saulcy, 57045 Metz cedex 01,  
France
- b. CIMULEC, ZI Les Jonquières, Rue Charles Picard, 57365 Ennery, France  
florient.tagnon@univ-lorraine.fr  
christophe.czarnota@univ-lorraine.fr (\*correspondant)  
sebastien.mercier@univ-lorraine.fr  
marion.martiny@univ-lorraine.fr  
lbodin@cimulecgroup.com

## Résumé :

*L'objectif de ce travail est de proposer une approche fondée sur la chaîne numérique et développée dans le cadre du Laboratoire Commun LEMCI (Laboratoire d'Etudes et de Modélisation des Circuits Imprimés, programme ANR-14-LAB7-0003-01) dédié à la création d'outils de prédiction de la fiabilité des circuits imprimés pour des applications de haute technologie. Dans l'industrie du circuit imprimé, la plupart des clients ne distribuent pas le design 3D des éléments à produire. Les données sont en effet fournies uniquement au format d'images 2D (format GERBER ou équivalent) contenant la représentation des pistes de cuivre ainsi que la position des perçages.*

*La démarche proposée s'appuie sur une phase de rétro conception permettant la reconstruction d'un modèle 3D complet issu en partie de l'information contenue dans les fichiers 2D fournis par les clients des entreprises manufacturières. La démarche intègre par ailleurs le savoir-faire et les connaissances métiers des fabricants de circuits imprimés. Les maquettes numériques 3D ainsi reconstruites sont alors intégrées dans des outils de calculs numériques standards (ABAQUS) enrichis de modèles de comportement identifiés et développés par le LEMCI. La démarche, couvrant en partie la chaîne numérique, vise à développer une stratégie d'optimisation de circuits imprimés.*

## Abstract :

*The aim of this paper is to propose a numerical chain based approach developed in the framework of the Common Laboratory LEMCI (Laboratory of Studies and Modeling for Printed Circuits, program ANR-14-LAB7-0003-01) dedicated to create predictive tools for the reliability of Printed Circuit Boards (PCB) for high added value applications. In the PCB industry, most of the customers do not provide complete 3D design of parts to be manufactured. In fact, only PCB manufacturing data (2D GERBER layer images), containing copper patterning and via positions, are provided.*

*The proposed approach relies on a reverse engineering concept giving a full reconstructed 3D design partly computed from data contained in 2D files provided by customers. The approach also integrates*

skills and knowledge of manufacturers. 3D digital mockup obtained from the reconstruction step is next implemented in a finite element software (here ABAQUS) coupled with user material subroutines developed in the framework of LEMCI. The proposed strategy, which partly covers the numerical chain, aims at developing an optimization procedure applied to PCB.

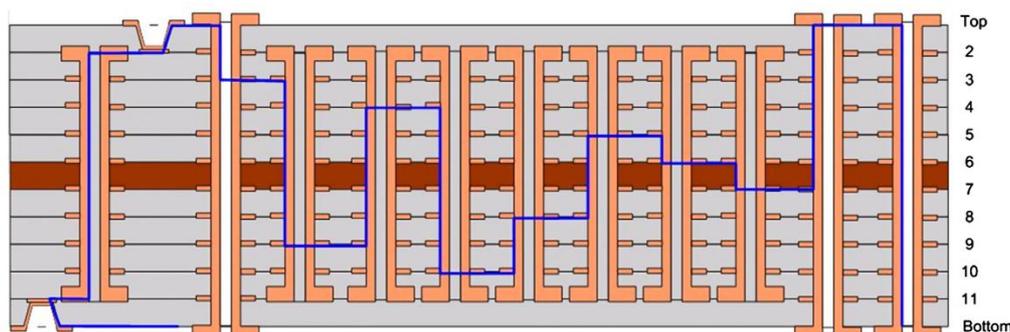
**Mots clefs : chaîne numérique, reconstruction 3D, automatisation de tâches, circuits imprimés**

## 1 Introduction

Le renouvellement industriel intégrant les outils de l'usine du futur est l'objectif visé du LabCom LEMCI, Laboratoire d'Etudes et de Modélisation des Circuits Imprimés. Ce laboratoire commun, entre le LEM3, Université de Lorraine, et CIMULEC, PME fabricant de circuits imprimés, est soutenu initialement par l'ANR sur la période 2015-2018.

Les nouvelles technologies bouleversent en profondeur l'industrie du circuit imprimé pour les applications à haute valeur ajoutée (aéronautique, aérospatiale, militaire, ...). Le marché associé concerne certes de faibles quantités de produits finis, mais certains projets pour des applications spécifiques nécessitent la production d'un grand nombre de prototypes durant la phase de validation. La durée des programmes peut ainsi augmenter considérablement, entraînant alors un surcoût important.

La conception des cartes (supports de composants électroniques) est souvent réalisée au sein des grands groupes qui mettent à disposition des fabricants des images 2D au format GERBER [1]. Une part de ces fichiers contient la description des différentes pistes de cuivre et couches de connexions électriques. Les pistes conductrices sont par exemple des images vectorielles (2D) tracées sur des feuillet de cuivre supportés par un stratifié. Par un procédé chimique, le cuivre non marqué est enlevé ne laissant apparaître que les pistes épargnées par l'image. Les différentes couches de cuivre sont alors assemblées entre elles et séparées de diélectriques. Pour finir, le circuit subit des opérations de perçage (dont les positions peuvent être également contenues dans des fichiers 2D), suivies d'un dépôt de cuivre dans les trous permettant de connecter les pistes entre elles. Pour les applications concernées, une dizaine de couches de cuivre viennent composer les cartes, voir Figure 1.

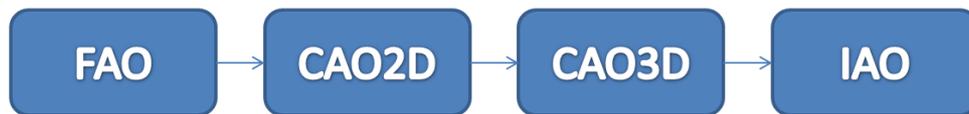


**Figure 1:** Schématisation d'une vue en coupe d'un circuit imprimé (11 couches de cuivre, épaisseur totale de 1.6mm). L'assemblage complexe est multi-matériaux (cuivre, résine époxy, fibres de verre, polyimide) et contient des trous traversants et enterrés. La ligne bleue représente les pistes de cuivre assurant la connexion électrique, Salahouelhadj et al. [2].

Disposer de la représentation volumique 3D d'un circuit imprimé est indéniablement un plus pour l'entreprise manufacturière dans la maîtrise des étapes de conception et d'analyses de faisabilité ou

encore de simulations numériques pour appréhender le niveau de fiabilité. C'est cette voie que le LEMCI se propose d'explorer en développant des outils de chaîne numérique pour la conception et la validation, via la simulation numérique, de circuits imprimés.

Le LEMCI propose ainsi une démarche permettant de passer de la FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) à l'IAO (Ingénierie Assistée par Ordinateur) dans le but de conduire des simulations numériques intégrant des matériaux utilisés dans l'industrie du circuit imprimé. L'organigramme habituel décrivant la succession d'étapes aboutissant à l'IAO est illustré en Figure 2 et peut prendre une quinzaine de jours, d'après Song et Han [3].



**Figure 2:** Processus habituellement mis en œuvre pour passer de la FAO à l'IAO, adapté de Song et Han [2].

L'automatisation de tâches apparaît donc comme une approche essentielle à mettre en œuvre afin de réduire les temps de transfert de données FAO vers l'IAO.

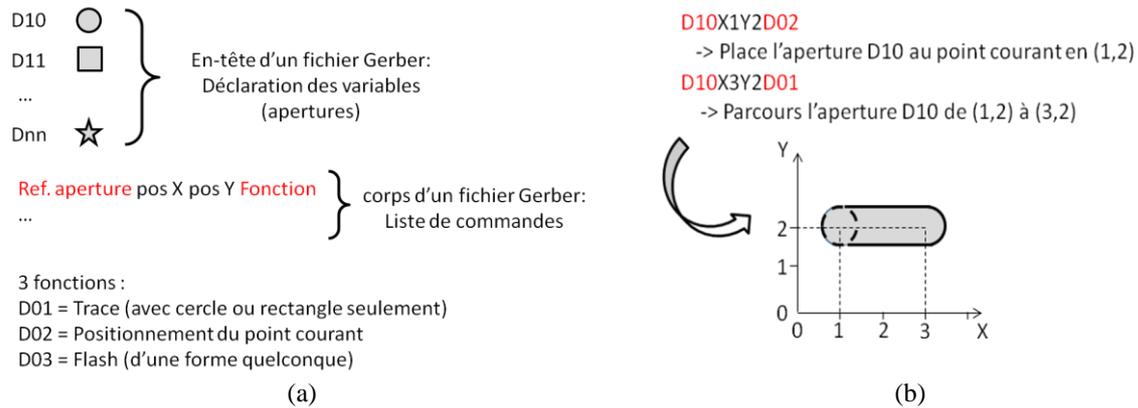
Soulignons que deux logiciels existent actuellement sur le marché: NETX-G développé par ArtWork au Canada et Native Board Import (NBI) développé par STS (Schindler Trade & Sales) en Allemagne. Le premier permet une visualisation complète du circuit mais ne reproduit pas fidèlement le fichier Gerber tandis que le second respecte plus fidèlement les données contenues dans le fichier source. Cela étant, aucun ne permet la reconstruction des fûts de cuivres (dépôt de cuivre dans les perçages), éléments essentiels à prendre en compte dans la simulation numérique ayant pour objectif la prédiction de la durée de vie.

Le LEMCI propose alors un modèle de reconstruction au plus proche de la réalité fondée sur une démarche d'analyse de fichiers GERBER, de traitement complet de données et de conversion vers des entités géométriques d'un logiciel de CAO. La procédure, présentée en détail dans ce papier, est entièrement automatisée et repose sur l'utilisation de macros VBA sous CATIA V5. Précisons que toutes les spécifications du format GERBER, évoquées en section 2, sont prises en compte dans l'outil développé qui conduit, in fine, à la conception volumique du circuit imprimé sous CATIA V5. Celle-ci permet notamment la simulation numérique de tout ou partie du circuit sur un code de calcul par éléments finis. A noter que la démarche proposée peut être adaptée à tous logiciels de CAO et éléments finis.

## 2 Support 2D : Format Gerber

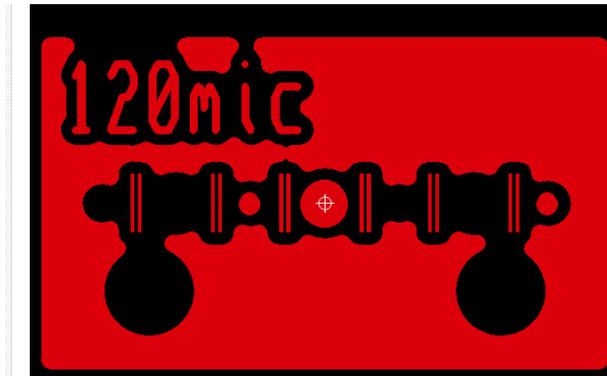
Le fabricant de circuits imprimés reçoit le plan des pistes de cuivre sous la forme d'une image vectorielle (2D). Pour réaliser le traçage des ces pistes sur le substrat, une succession d'opérations de photolithographie ou photolithographe (insolation, attaque chimique) est nécessaire. Au final, la piste de cuivre forme une succession de motifs d'un point à un autre. Ces motifs, appelées ouvertures, peuvent être élémentaires (cercle, rectangle, ...), ou obtenus par combinaison de motifs élémentaires et alors présenter une forme quelconque, voir Figure 3.

Deux formats de fichiers sont destinés à la fabrication de PCBs: Gerber, et ODB++. Le format Gerber, sous sa forme étendue désignée 'RS-274X', est le format que nous avons retenu dans cette application. Il couvre plus de 90% de la production de PCBs dans le monde [4].



**Figure3:** (a) Structure d'un fichier Gerber - 'Dnn' illustre une ouverture obtenue par combinaison de motifs élémentaires. (b) Résultat de l'exécution de deux lignes d'instruction.

La structure d'un fichier Gerber destiné au marquage d'empreintes est illustrée en Figure 3. L'en-tête contient l'ensemble des ouvertures utilisées dans le corps du code Gerber, Figure 3a. Le positionnement d'une ouverture est éventuellement suivi d'une instruction de parcours conduisant à la définition d'un marquage (Figure 3b). On trouvera également la définition de contours de zones qui seront remplies ou laissées vides. Un fichier Gerber permet ainsi la création, sur un plan, d'un ensemble d'objets graphiques ayant une forme, une taille, une position ainsi qu'une polarité (sombre ou claire). L'utilisation d'un logiciel dédié (e.g. Gerber Viewer [5]) permet de visualiser le résultat des instructions contenues dans un fichier donné, Figure 4.



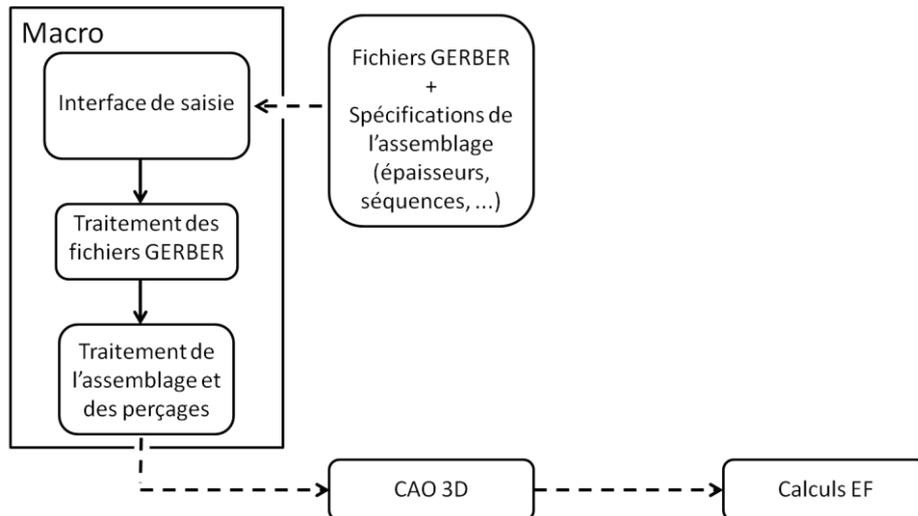
**Figure 4:** Visualisation d'un fichier Gerber à l'aide du logiciel Gerber-Viewer [5]. Le fichier utilisé contient 259 lignes.

En supplément d'un fichier Gerber contenant le détail des pistes de cuivre, d'autres fichiers Gerber, nécessaires à la reconstruction du circuit imprimé, contiennent l'ensemble des instructions de perçages définies par des cercles pleins et leur position.

### 3 Reconstruction 3D et simulation numérique

#### 3.1 Synoptique

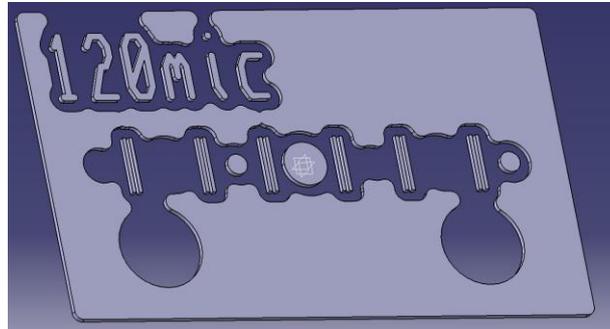
L'essentiel de la solution proposée est développé sous CATIA V5 par l'utilisation de macros VBA [6]. Le synoptique sur lequel s'appuie la démarche est indiqué en Figure 5.



**Figure 5:** Synoptique illustrant la démarche développée. La procédure automatisée part du code Gerber source reçu par le fabricant de circuits imprimés et permet la visualisation en 3D de la carte. Un transfert peut être ensuite envisagé sous un logiciel de calculs EF. La plupart du temps, seule une partie de la carte sera analysée précisément par EF.

L'utilisateur précise, via une interface, les différents fichiers Gerber utilisés à la définition de l'assemblage à reconstruire ainsi que certaines spécificités telles que l'épaisseur des différentes couches de diélectriques, certaines caractéristiques liées au perçage, ...

La reconstruction est essentiellement constituée d'extrusions et d'opérations booléennes entre différents corps de pièces. La Figure 6 illustre par exemple la reconstruction du fichier Gerber correspondant au visuel de la Figure 4. L'opération a nécessité moins de 1 minute sur un PC standard.



**Figure 6:** Reconstruction 3D du fichier Gerber visualisé en Figure 4.

La méthodologie précisément mise en œuvre et non illustrée ici, permet une identification dans l'arbre de spécification des différents éléments du circuit imprimé reconstruit (sélection par matériau, par couches, par opération de perçage, ...).

La procédure a été appliquée à des cartes complètes mais aussi à des coupons tests. La Figure 7 montre une vue générale du circuit reconstruit (coupon test, 20mmx12mm) et met en évidence la prise en compte de la phase de métallisation suite au perçage. Concernant le traitement de cet assemblage, 12 fichiers Gerber pour les traçages des pistes, et 1 fichier Gerber pour les perçages ont été utilisés pour un temps de reconstruction de 6min30 sur un PC standard. A noter qu'un coupon test est un modèle réduit de la carte qui a été produite, contenant tous les éléments spécifiques de la carte, mais en nombre plus réduit.



**Figure 6:** (a) Vue générale d'un circuit imprimé reconstruit. (b) Vue en coupe d'un trou métallisé ainsi que de la structure interne de la carte. Les éléments en cuivre sont représentés en jaune-orange.

Le programme créé sous VBA est donc capable de convertir des données d'image 2D (Gerber) en pièces 3D sous CATIA V5. Comme cela a déjà été indiqué, l'algorithme développé est cependant suffisamment général pour être étendu à d'autres langages de programmation et logiciels de CAO.

## 3.2 Analyse par éléments finis sous Abaqus

Le LEMCI travaille à la fois sur la reconstruction 3D et la caractérisation des matériaux utilisés pour proposer une chaîne numérique capable de déterminer la durée de vie d'un circuit avant même sa mise en fabrication. Selon le synoptique de la Figure 5, l'étape suivante porte sur le calcul par éléments finis du circuit imprimé, vu comme un assemblage multi-matériaux présentant notamment des hétérogénéités de propriétés thermo-élastiques, alors que le cuivre a un comportement élasto-plastique. Un problème récurrent est la rupture de fûts de cuivres (dans les trous métallisés) sous sollicitation thermique cyclique [1]. Le recours à l'analyse numérique devient alors un outil indispensable pour prédire la fiabilité/durée de vie des circuits imprimés tout en limitant les coûts de fabrication liée à la réalisation de prototypes. L'intégralité du circuit ne peut être simulée en raison du nombre trop important de degrés de liberté qu'il faudrait considérer dans le modèle éléments finis. Une procédure automatisée, non présentée ici, a par ailleurs été développée au sein du LEMCI, permettant une découpe paramétrée d'une zone d'intérêt représentative d'une région critique du circuit.

## 4 Conclusion

Ce travail présente une démarche et les résultats d'une reconstruction d'un circuit imprimé de haute technologie. L'intérêt de disposer d'un concept 3D est double. D'une part, la CAO permet de visualiser avec précision le produit avant l'étape de fabrication et mener ainsi une étude de faisabilité n'engageant aucun coût, révélant ainsi un grand intérêt pour le fabricant mais aussi le client. D'autre part, des sous-éléments identifiés comme critiques lors de la phase de qualification du produit (cycles thermiques  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+125^{\circ}\text{C}$ ) peuvent être isolés du concept 3D global, maillés et simulés par éléments finis. En raison de l'hétérogénéité des matériaux mis en œuvre, les contraintes d'origine thermique peuvent conduire à la rupture du cuivre situé dans les trous. Par cette approche couplant rétro conception, sélection de zones critiques et simulation numérique, le LEMCI souhaite proposer un outil dédié à la prévision de la durée de vie des cartes dans leur environnement de fonctionnement, la validation des designs imposés par le client, voire leur redéfinition via un processus d'optimisation. Ces différentes

étapes s'appuient sur la connaissance du comportement mécanique des différents matériaux intégrés dans la carte, autre axe du Labcom LEMCI. Enfin l'objectif du Labcom LEMCI est de compléter l'outil de chaîne numérique par l'intégration de l'impression 3D dans l'étape de fabrication/prototypage. La solution de rétro conception développée et présentée ici permettra, via la CAO volumique obtenue, un transfert aisé des données de fabrication vers une imprimante 3D.

## Remerciements

Les auteurs remercient le soutien de l'ANR via le programme Labcom ANR-14-LAB7-0003-01 et la création du labcom LEMCI.

## Références

- [1] Ucamco, The Gerber File Format Specification, Ucamco, (2016).
- [2] A. Salahouelhadj, M. Martiny, S. Mercier, L. Bodin, D. Manteigas, B. Stephan, Microelectronics Reliability 54-1 (2014), 204-213.
- [3] I. Song, S. Han, Implementation of the direct integration from CAM to CAE for the PCB simulation, Computers in Industry 64 (2013) 1014–1021.
- [4] K. Tavernier, The great Gerber vs. ODB++ Debate, Gerber - the Smartest Way Forward, The PCB Design magazine, 12-16 (Sept. 2014).
- [5] Gerber Viewer, <http://www.gerber-viewer.com/>
- [6] N. Weisenberger, VB Scripting For CATIA V5 (2012).