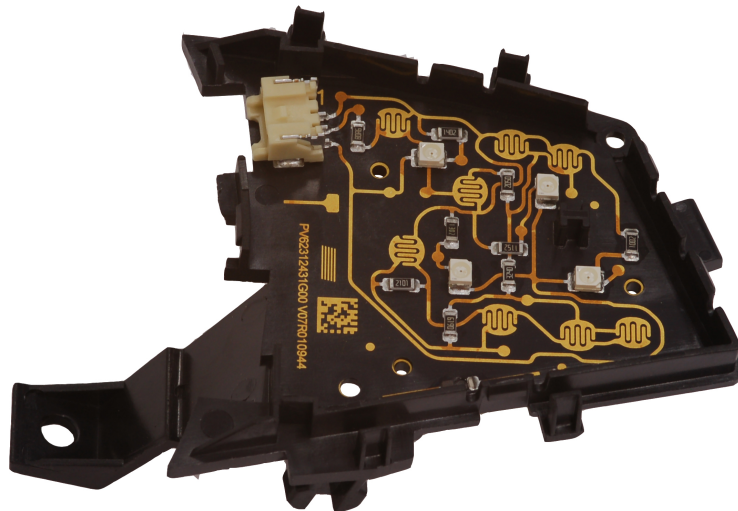


ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

MÉTHODES DE PRODUCTION

Molded Interconnect Devices



Étudiants :
Antoine ALBERTELLI
Quentin HERZIG

Enseignants :
Pr. Jacques JACOT
Pr. Peter RYSER
Dr. Jean-Daniel LÜTHI

13 décembre 2013

Table des matières

1	Introduction	1
2	Applications	1
2.1	Automobile	1
2.2	Consumer Electronic	2
2.3	Médical	2
3	Conception de MID	3
3.1	Matériaux utilisables	3
3.2	Limites du procédé LDS	4
3.3	Prototypage	4
4	Procédés de fabrication des MID	5
4.1	Laser Direct Structuring	5
	4.1.1 Principe de base du procédé	6
	4.1.2 Métallisation	6
4.2	Two-shot molding	7
5	Étude de coûts	7
5.1	Injection	8
5.2	Activation Laser	9
5.3	Métallisation	10
5.4	Récapitulatif	10
5.5	Comparaison avec un PCB	11

1 Introduction

Un *Molded Interconnect Device* (MID) est un circuit électronique dont le support est un substrat thermoplastique moulé par injection, par opposition aux *Printed Circuit Boards* (PCBs) conventionnels dont le substrat est un composite plat.

Les MIDs permettent de regrouper dans une seule pièce des fonctions mécaniques et électroniques. En effet, contrairement aux PCBs, les MIDs peuvent être conçus en trois dimensions, ce qui réduit considérablement le nombre de composants et de connecteurs, diminuant ainsi le temps d'assemblage, et donc le coût du système.

Les MIDs ne sont toutefois pas une solution de remplacement des PCBs, car ils ne permettent pas une grande densité de pistes, tandis que les PCBs à plus de deux couches sont désormais peu coûteux et permettent des circuits à forte densité.

2 Applications

Les MIDs se rencontrent dans des milieux très variés, mais qui ont tous en commun de demander une forte intégration entre l'électronique et la mécanique.

2.1 Automobile

L'électronique embarquée dans les voitures devient de plus en plus complexe afin d'augmenter le confort et la sécurité des passagers. À l'inverse, le coût d'assemblage, le poids et par conséquent le nombre de pièces doivent être réduits

afin de continuer à proposer des modèles abordables. Les MIDs sont des solutions adaptées pour remplacer les fils et la connectique, tout en intégrant des fonctions mécaniques, comme des boutons ou de la structure.

À la fig. 1, on peut remarquer le gain en simplicité obtenu dans le cas d'un volant multi-fonction. Ces volants, de plus en plus courants dans les voitures actuelles, permettent au conducteur de changer de chaîne de radio, de rapport de boîte à vitesse, etc. L'utilisation d'un MID a permis ici de simplifier le câblage : Les fils ont été supprimés et les boutons ont été remplacés par des contacts recouvert d'un tapis conducteur en silicone.

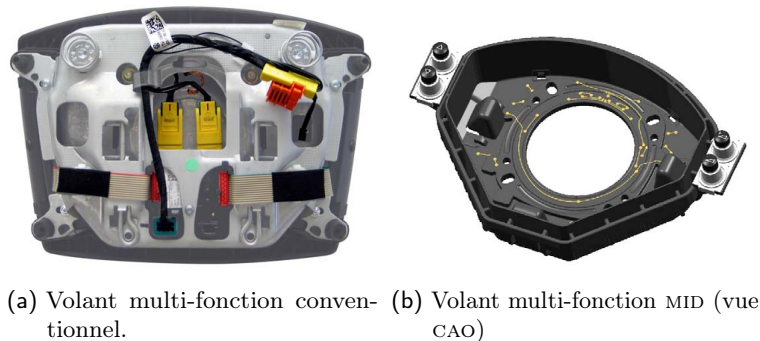


Fig. 1: Exemple d'utilisation des MIDs dans l'automobile.

2.2 Consumer Electronic

Dans le domaine de l'électronique grand public, la miniaturisation, la diversification et la réduction des coûts posent des difficultés importantes. Créer une antenne miniaturisée en MID offre deux avantages majeurs par rapport aux antennes classiques et aux *PCB trace antenna* :

- L'encombrement est réduit, soit en enroulant l'antenne sur elle même, soit en l'intégrant directement au châssis de l'appareil,
- La directivité de l'antenne est parfaitement maîtrisable, permettant ainsi une réception optimale quelque soit l'orientation.

La fig. 2 montre l'utilisation des MID pour fabriquer une antenne miniature (4mm de côté) soudable sur un PCB et pour fabriquer une antenne intégrée au châssis d'un smartphone. Ces images proviennent de la société Molex, qui utilise les MID pour la production à très grande échelle et le prototypage de ses antennes.

2.3 Médical

Une autre application intéressante des MIDs se situe dans le milieu du médical, et plus particulièrement des implants auditifs. Ce secteur cherche en effet à miniaturiser de plus en plus ses produits, afin de les rendre plus discrets, ce qui demande une intégration entre électronique et mécanique très poussée. La fig. 3 montre l'utilisation faite par Siemens d'un MID comme châssis et connecteur d'un implant. Il n'existe, à notre connaissance, pas d'exemple d'utilisation de MID dans des prothèses vitales, comme des stimulateurs cardiaques.

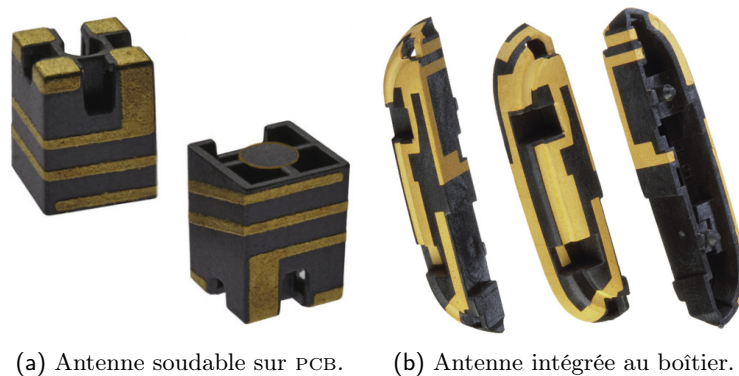


Fig. 2: Utilisation des MID dans les antennes.



Fig. 3: Chassis d'implant auditif, réalisé en MID.

3 Conception de MID

La conception des MID commence par la création du schéma électrique dans un logiciel de conception électronique standard, puis le schéma est exporté sous forme de *netlist*, c'est à dire d'une liste de connexion entre différents composants. Le design mécanique du MID se fait dans un logiciel de DAO standard, comme Solidworks puis est exporté au format STEP.

La *netlist* et le fichier STEP sont ensuite importés dans un logiciel spécifique¹ pour l'étape de routage (placement des pistes). Lors de cette étape on place aussi des repères appelés *fiducials* qui seront utilisés par les machines d'activation et d'assemblage pour faire un alignement visuel. On peut également placer des codes-barres 2D (*datamatrix*) qui seront modifiés par la machine d'activation pour y placer un numéro de série, afin de faire du suivi des pièces.

3.1 Matériaux utilisables

Les contraintes inhérentes à la technologie *Laser Direct Structuring* (LDS) limitent fortement le choix des matériaux :

- La pièce étant injectée puis activée, le matériaux choisi doit être un thermoplastique,
- Pour l'étape d'activation, le polymère doit pouvoir se lier avec un dopant organométallique, généralement à base de palladium,

1. Nextra de chez Mecadtron <http://www.mecadtron.com/produkte/nextra.en.php>

- L'assemblage des composants par *reflow soldering* exige une température de fusion élevée.

LPKF a donc créé une liste de matériaux utilisables et recommandés pour le LDS. Cette liste est visible dans le tab. 1. Une liste de fournisseur proposant ces matériaux déjà dopés est également disponible chez LPKF [7].

Type	Matériau
LCP	Liquid Crystal Polymer
PA 6/6T	Polyamide
PBT	Polytéréphtalate de butylène
PBT/PET	Mélange de PBT et de PET
PPA	Polyphthalamide
PC	Polycarbonate
PC/ABS	Mélange de PC et d'ABS

Tab. 1: Matériaux utilisables comme substrat

Source : [7]

3.2 Limites du procédé LDS

La conception de circuits MID est délicate car elle doit prendre en compte des limites provenant de l'injection plastique, de l'activation laser et de la métallisation. L'ingénieur doit donc porter un soin tout particulier à la conception, car des petits détails, comme des trous borgnes, peuvent augmenter significativement le coût de la pièce, voir même la rendre impossible à réaliser. L'ensemble des règles de conception à respecter est compilée dans un seul document, fourni par LPKF [7]. Nous allons ici nous concentrer sur les plus importantes.

La plus grosse limitation des MID par rapport au PCB est la faible densité de pistes atteignable. En effet, il est impossible de fabriquer des MID avec des couches internes, là où des circuits à 16 couches sont facilement atteignables dans le domaine des PCB. De plus, les MID ne permettent pas de faire des pistes très fines ou très serrées : On considère généralement qu'il faut rester au dessus de 150 μm .

A compléter...

3.3 Prototypage

Le LDS offre différentes possibilités de prototypage simples, puisque la seule étape différente de la production est la création de la pièce de base en polymère. Les étapes d'activation et de métallisation sont donc inchangées par rapport à la production.

- Une première méthode consiste à usiner directement dans un bloc de polymère activable (les déchets peuvent être réutilisés pour l'injection d'autres pièces). Pour cette alternative, il faut posséder une CNC pour effectuer l'usinage dans le bloc.
- Une deuxième méthode est de mouler une pièce à l'aide d'un "soft mold". Il s'agit d'un moule, typiquement en alu, produit grâce à l'usinage grande vitesse, qui permet de garantir une série d'environ 1000 pièces. Il faut

savoir que ce moule doit être produit par une entreprise spécialisée, donc le délai avant la réception du moule et le début du prototypage, est d'environ 4 semaines. Après réception du moule, le processus est identique à la méthode standard : injection, activation laser, métallisation. Le coût de cette méthode représente 10% du coût de la pièce finale.

- Il est également possible de créer un moule en silicone à partir de l'empreinte d'une pièce maîtresse stéréolitographiée (ou imprimée en 3D). Ce moule assure une série de 25 pièces coulées sous vide en PUR activable, mais nécessite une machine de coulage sous vide.
- LPKF a également développé et vend un spray de revêtement activable par laser. L'avantage de ce revêtement est qu'il est applicable sur une pièce en polymère classique, rendant ainsi la surface de cette pièce activable au laser, après un passage bref au four pour solidifier la laque. Il est donc possible de créer la pièce de base par impression 3D, en choisissant un polymère stable à 90° pour supporter les bains de métallisation. La suite du processus est également identique à la production standard. Le délai de réception d'une pièce imprimée en 3D commandée dans une entreprise spécialisée est d'environ 1 semaine.

4 Procédés de fabrication des MID

Il existe actuellement 2 méthodes de production de MID sur le marché : le LDS et le *Two-shot molding*. Depuis son introduction sur le marché en 2006, le LDS a pratiquement éclipsé le Two-shot, car celui-ci est plus compliqué à mettre en œuvre et plus cher. Le two-shot était surtout utilisé pour produire des grandes quantités à bas coût, mais avec la baisse des prix, le LDS est désormais préféré pour la production de masse. Par exemple, Molex, le plus gros constructeur d'antennes SMD au monde utilise actuellement uniquement le procédé LDS.

4.1 Laser Direct Structuring

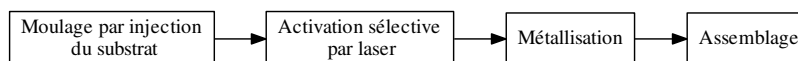


Fig. 4: Vue d'ensemble du processus *Laser Direct Structuring*

Le LDS est un procédé relativement récent, ayant été introduit sur le marché en 2006. Par conséquent, c'est une technologie brevetée de LPKF Lasers & Electronics AG en Allemagne. Leur site web² est donc une excellente source d'informations pour la conception de pièces utilisant le LDS.

2. www.lpkf.com

4.1.1 Principe de base du procédé

Le principe général du procédé est visible à la fig. 4. On retrouve donc, dans l'ordre :

Injection La pièce est d'abord moulée par un procédé d'injection standard. Le détail de cette étape sort du cadre de ce séminaire. On se référera à celui sur l'injection plastique.

Activation Le polymère ayant servi pour l'injection de la pièce a préalablement été dopé avec un composant organométallique qui est activé par le laser en suivant le tracé des pistes voulues. Une réaction physique décompose alors ce dopant entre partie métallique et partie organique. Les lasers utilisés sont typiquement des lasers infra-rouges d'une longueur λ 1000 nm.

Métallisation L'étape de métallisation commence par une étape de nettoyage, afin de faciliter l'accrochage. Les pistes sont ensuite construites par dépôt de fine couches (environ 5 μm). Finalement, un traitement de surface contre l'oxydation est appliqué. Ce traitement consiste généralement en une couche de nickel suivi d'une couche d'or, mais des traitements spécifiques, à base d'étain ou d'argent sont également possibles.

Assemblage Les composants électriques annexes (boutons, connecteurs, etc...) sont soudés sur le MID. Pendant le prototypage cette étape est souvent faite à la main, avec un fer à souder. Pour la production, si le polymère a une température de fusion suffisamment élevée, l'assemblage par *reflow soldering*³ est possible.

4.1.2 Métallisation

L'étape de métallisation est celle qui va déposer les pistes sur le polymère à proprement parler. Afin de garantir le bon fonctionnement de cette étape, un rinçage de la pièce entre chaque bain est effectué, ainsi qu'un séchage à chaud après le dernier bain, afin d'enlever toute trace sur la pièce finale.

Le premier bain de cuivre se fait sans électrolyse, vu qu'aucune piste conductrice n'existe pour le moment. Dans ce bain, du cuivre va croître autour des atomes de métal présent à la surface du polymère et se liera aux microcavités résultant de l'activation laser. L'épaisseur maximum atteignable lors de ce premier bain est de 5 à 8 μm .

Dans les applications à fort courants, une grande épaisseur de cuivre est souhaitée. Pour y parvenir, on peut, après le premier bain, faire une déposition électrolytique du cuivre. Pour cela, il faut que toutes les pistes soient connectées entre elles en un point. Si ce n'était pas le cas, il faudrait connecter les pistes une à une à l'électrode, ce qui serait long et donc coûteux. Le point de connexion est généralement placé sur une partie séparable mécaniquement qui est enlevée après la métallisation.

Une fois ce premier bain terminé, une couche de protection contre l'oxydation est appliquée. En effet une oxydation de la couche de cuivre ruinerait les propriétés électriques du circuit. Cette couche est généralement composée d'une couche de nickel suivie d'une couche d'or. Le rôle de cette dernière est d'empêcher

3. Se référer au séminaire [3].

l'oxydation de la couche de cuivre, tandis que la couche de nickel sert à empêcher le cuivre de diffuser dans l'or, ce qui détruirait la protection anti-oxydation.

4.2 Two-shot molding

Le two-shot molding est un procédé antérieur au LDS et qui n'est pas breveté. Il est essentiellement utilisé dans le milieu de l'injection plastique, pour produire des pièces injectées de différentes couleurs, comme des touches de clavier d'ordinateur. Cette méthode consiste à d'abord mouler les pistes dans un polymère dopé, puis à "surmouler" la forme définitive de la pièce autour (fig. 5b). Finalement, la pièce est métallisée suivant le même procédé que dans le LDS, mais le cuivre ne se dépose que sur les parties exposées du polymère dopé (fig. 5c).

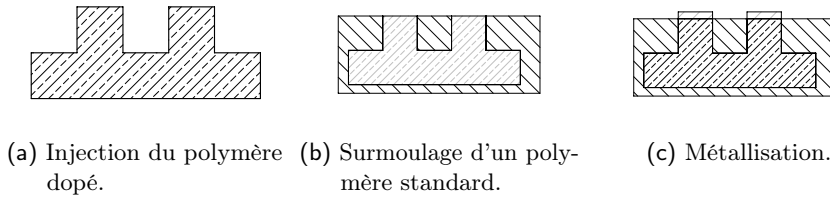


Fig. 5: Procédé two-shot

5 Étude de coûts

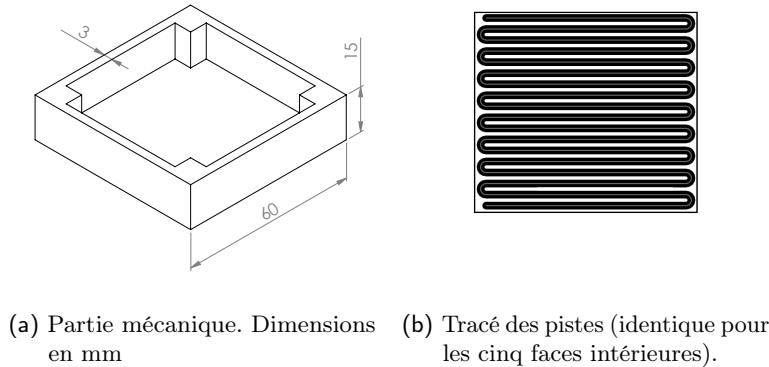


Fig. 6: Pièce d'exemple. Les dimensions et la géométrie sont approximatives. La largeur des pistes et la distance entre deux pistes est de $150\ \mu\text{m}$.

Pour notre étude de coûts, nous avons décidé de nous baser sur la série en production chez Cicorel lors de notre visite. Les tableaux de calculs de coûts restent néanmoins valables, moyennant un changement de certaines valeurs. Les paramètres à changer en fonction de la pièce sont indiqués dans le détail de chaque partie.

Descriptif de la pièce La pièce que nous considérons est une pièce relativement simple. Il s'agit d'un couvercle anti-ingénierie inverse pour lecteur de carte de crédit. Le rôle de cette pièce est de détecter toute tentative d'accéder à l'intérieur de l'appareil, soit en le démontant, soit en le perçant. Pour accomplir cette fonction, deux pistes sont placées en serpentin à l'intérieur du couvercle. L'appareil est programmé pour effacer toutes les données sensibles dès qu'une de ces pistes est rompue. Cette pièce était malheureusement confidentielle et nous n'avons pas pu la prendre en photo. On peut l'approximer par la boîte creuse visible à la fig. 6.

5.1 Injection

Électricité		
Consommation électrique	5	kW
Prix de l'électricité	0.2	CHF/(kW h)
Coût d'électricité	1	CHF/h
Machines		
Machine d'injection	130 000	CHF
Fonctionnement	6240	h/année
Amortissement sur 5 ans	4.17	CHF/h
Opérateurs		
Opérateur à 10%	6	CHF/h
Matière		
Matière (PC)	11	CHF/kg
Poids de la pièce	25	g
Coût de la matière	0.27	CHF/pièce
Outillage		
Prix du moule	20 000	CHF
Pièces par série	500 000	pièce
Coûts d'outillage	0.04	CHF/pièce
Coût horaire	11.67	CHF/h
Temps de cycle	20	s/pièce
TOTAL	0.38	CHF/pièce

Tab. 2: Calcul des coûts de l'injection plastique

L'étape d'injection plastique demande un moule usiné soit par électroérosion, soit par usinage à grande vitesse. Le coût du moule a été estimé suivant les calculs présentés dans le séminaire[2]. Le détail de ces calculs sortant du cadre du présent séminaire, nous avons fait le choix de ne pas les inclure.

Nous avons également supposé que la pièce est faite dans la matière la moins cher, c'est à dire le polycarbonate. Les polymères activables sont environ 20% plus cher que leur homologue non activable d'après notre contact chez Cicorel. Les prix des matériaux varient entre 11 CHF/kg pour du PC et 220 CHF/kg pour

du PEEK.

5.2 Activation Laser

Pour calculer le coût de l'étape d'activation sélective (LDS) nous avons fait quelques hypothèses :

- Le secteur d'activation laser tourne 24 h par jour, 5 jours sur 7.
- La machine est une Microline 160i de chez LPKF coûtant 220 000 CHF. Elle est amortie en 5 ans.
- Un opérateur ne peut s'occuper que d'une machine à la fois.
- La machine consomme en permanence sa puissance de pointe soit 2.5 kW [6]. L'électricité représentant une fraction faible du coût final, cette hypothèse n'induit pas de grande erreurs.

Le calcul de la surface occupée par les pistes sur notre circuit se base sur une largeur de piste de 150 μm et une distance entre deux pistes de 150 μm également, pour une piste occupant toute la surface du circuit. Pour une autre pièce, la surface des pistes peut souvent être obtenue dans le logiciel de conception.

Électricité		
Consommation électrique	2.5	kW
Prix de l'électricité	0.2	CHF/(kW h)
Prix de l'électricité	0.5	CHF/h
Machines		
LPKF Microline 160i	220 000	CHF
Fonctionnement	6240	h/année
Amortissement sur 5 ans	7.05	CHF/h
Opérateurs		
Opérateur à 100%	60	CHF/h
Temps de cycle		
Vitesse du laser	4000	mm/s
Diamètre du laser	80	μm
Vitesse de balayage	320	mm^2/s
Surface des pistes	3000	$\text{mm}^2/\text{pièce}$
Temps de balayage	9.375	s/pièce
Temps de positionnement	1	s/orientation
Nombre d'orientations	5	
Temps de mise en place, retrait et inspection	15	s/pièce
Temps total	29.375	s/pièce
Coût horaire	67.68	CHF/h
Temps de cycle	29.375	s/pièce
TOTAL	0.55	CHF/pièce

Tab. 3: Calcul des coûts de l'activation sélective par laser

5.3 Métallisation

Calculer le coût réel de cette étape est difficile, car beaucoup d'informations ne sont pas disponibles publiquement : le prix des bains et de la station d'épuration des eaux usées (STEP) pour ne citer que ces deux là, ne sont pas trouvable chez les fournisseurs. De plus filtrer les bains pour les recycler permet de récupérer un peu de matière qui est revendue, ce qui intervient dans le calcul de coût, mais est difficile à estimer. Finalement, notre contact chez Cicorel a refusé de détailler leur méthode de calculs pour ces bains, en nous répondant qu'il s'agissait de données internes et confidentielles.

Nous avons donc estimé que le coût pour déposer 1 kg de métal par voie chimique était environ cinq fois le prix de ce métal sur le marché. Ce coût inclut la STEP, le chauffage des bains et l'électricité consommée par le robot servant à déplacer les pièces d'un bain au suivant. Cette estimation peut sembler hasardeuse, mais elle donne néanmoins une approximation suffisante pour l'ingénieur désireux d'utiliser ce procédé. À ce coût des matériaux il faut ajouter l'amortissement de la machine sur cinq ans et l'opérateur (deux opérateur pour trois lignes).

Machines		
Chaîne de bain	1 000 000	CHF
Fonctionnement	6240	h/année
Amortissement sur 5 ans	32	CHF/h
Opérateurs		
Opérateur à 66%	40	CHF/h
Matière		
Cuivre chimique	100	CHF/kg
Nickel chimique	100	CHF/kg
Or chimique	175 000	CHF/kg
Couche de cuivre (6 µm)	5.34	CHF/m ²
Couche de nickel (6 µm)	5.34	CHF/m ²
Couche d'or (0.05 µm)	168.875	CHF/m ²
Surface de piste	3×10^{-3}	m ² /pièce
Coût de la matière	0.54	CHF/pièce
Coût horaire	72	CHF/h
Temps de cycle	2	h
Pièces par bain	400	
TOTAL	0.90	CHF/pièce

Tab. 4: Calcul des coûts de la métallisation.

5.4 Récapitulatif

Le calcul des coût appliqué au couvercle d'exemple (fig. 6) donne le résultat visible dans le tab. 5.

Injection	0.38	CHF/pièce
Activation sélective	0.48	CHF/pièce
Métallisation	0.68	CHF/pièce
TOTAL	1.54	CHF/pièce

Tab. 5: Récapitulatif des coûts.

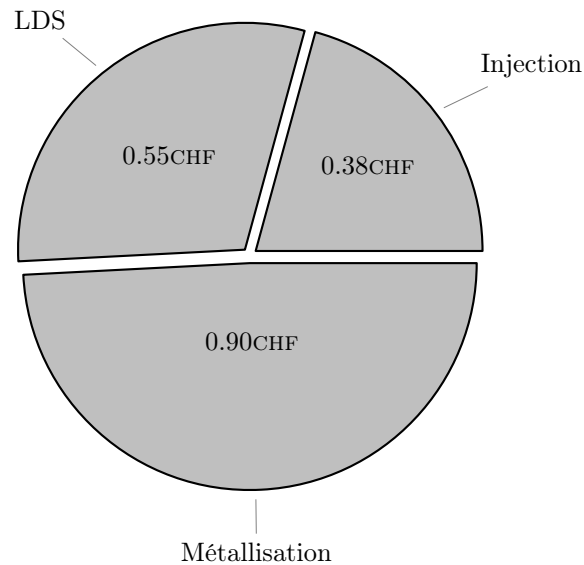


Fig. 7: Répartition des coûts selon les étapes pour la pièce d'exemple.

5.5 Comparaison avec un PCB

Pour bien illustrer les avantages des MIDs dans ce type d'applications, nous avons imaginé une autre solution pour cette fonction, qui utilise un PCB fixé dans une coque en polycarbonate (PC) moulée par injection. Les principales différences à prendre en compte sont :

- Le prix de la matière de la coque, 3 CHF/kg pour du PC standard, contre 11 CHF/kg pour sa variante activable.
- Le coût de fabrication du PCB équivalent. Dans cet exemple nous considérons un PCB qui ne couvre que le fond du boîtier, contrairement à une solution MID qui couvre également les parois latérales.
- On considère que le PCB est fixé mécaniquement au boîtier et que cette étape est faite à la main.
- Un connecteur doit être soudé sur le PCB tandis qu'en MID le connecteur est intégré directement dans la pièce.

Pour calculer le coût du PCB nous avons utilisé le séminaire[8], avec les paramètres suivants :

- Dimensions de la carte : 60x60 mm.
- Circuit monocouche.

— Pas de via, pas de trous.

— Pas de sérigraphie.

Nous arrivons donc à un coût de 3.13 CHF/pièce. A ce coût s'ajoutent le connecteur et son assemblage (0.5 CHF/pièce), le boîtier injecté (0.2 CHF/pièce) et l'assemblage du PCB dans ce dernier par l'opérateur (10 s à 1 CHF/min soit 0.15 CHF/pièce). On arrive à un total d'environ 4 CHF/pièce soit deux fois plus que l'alternative MID, tout en offrant une moins bonne protection contre l'intrusion sur les côtés.

Références

- [1] S. AMATI, M. GUNN et G. VETSCH : Molded Interconnect Devices. Rap. tech., EPFL, Décembre 2012.
- [2] B. CALDAS et B. DA SILVA : Électroérosion. Rap. tech., EPFL, Octobre 2013.
- [3] S. T. GOY et B. C. D. VERMOT : Montage des composants SMD. Rap. tech., EPFL, Octobre 2013.
- [4] N. HEININGER, W. JOHN et H.-J. BOSSLER : Manufacturing of molded interconnect devices from prototyping to mass production with laser direct structuring. *In International Congress MID*, 2004.
- [5] L. LEIMBRUGER et K. KANGUR : Molded Interconnect Devices. Rap. tech., EPFL, Décembre 2011.
- [6] LPKF LASER & ELECTRONICS AG : Laser Direct Structuring of 3D Circuit Carriers : LPKF MicroLine 3D. Product Brochure.
- [7] LPKF LASER & ELECTRONICS AG : Design rules for laser direct structured MID components. Application Note, Septembre 2010.
- [8] Y. MOTTAS et S. KOMI : Fabrication de circuits imprimés. Rap. tech., EPFL, Octobre 2013.
- [9] SUMITOMO (SHI) DEMAG PLASTICS MACHINERY GMBH : Multi-component technology. <http://www.sumitomo-shi-demag.eu/processes/multi-component-technology/rotary-plate.html>, Octobre 2012.