
ETUDE ET CONCEPTION D'UNE DALLE TACTILE BASEE SUR UNE LIGNE DE TRANSMISSION

Le système tactile proposé dans ce travail est composé de deux parties principales : La surface tactile et le circuit de détection et de localisation. Dans ce chapitre, c'est la première partie qui est traitée : la dalle tactile. Elle est basée sur une ligne de transmission sensible à un toucher. La connexion de la dalle est réalisée à travers le port unique d'entrée de la ligne.

Comment une ligne de transmission peut elle être rendu sensible au toucher ? Et comment elle devrait être conçue ? La réponse à la première question va être établie à partir de l'étude théorique du modèle électrique des lignes de transmission qui sera la première partie de ce chapitre. Ensuite, la conception de la ligne est basée sur des critères de base qui sont l'adaptation et la sensibilité de la ligne. La notion d'adaptation de ligne est introduite. Elle est liée au principe de détection du toucher.

Après, différents types de lignes de transmission sont exposés. Le choix d'un seul type est élaboré en fonction de deux critères de base qui sont la sensibilité de la ligne aux évènements du voisinage (tel que le toucher), et la bonne transmission du signal avec les moindres pertes (pour une longue ligne qui couvre une grande surface).

Pour le type de ligne choisi, sa partie conception est présentée. Elle inclut le bon choix de la forme que prendra la ligne pour couvrir la surface sensible au toucher ainsi que ses dimensions. Ces dernières sont très importants dans cette étude parce qu'ils sont en relation directe avec l'adaptation, la bonne transmission, ainsi que la précision de localisation.

Enfin, c'est l'implémentation technologique qui est présentée. Après la description des différents procédés de réalisation, différentes lignes de différentes formes et sur différents types de substrats (rigides et souples) vont être présentées. Elles sont également caractérisées pour la représentation de leurs paramètres caractéristiques.

2.1. Modélisation d'une ligne de transmission

Une ligne de transmission est l'ensemble de deux conducteurs qui acheminent un signal électrique d'une source vers une charge connectée à l'extrémité et qui joue le rôle de récepteur.

Toute ligne de transmission est caractérisée, d'abord, par une impédance caractéristique. C'est la valeur de l'impédance qui permet le transfert maximal de puissance sur la charge placée à son extrémité sans occasionner de réflexion.

D'autres paramètres caractérisent une ligne de transmission. Sa constante d'affaiblissement conditionne les pertes dans la ligne et sa vitesse de phase (V_ϕ) est la vitesse avec laquelle se propagent

les signaux. Cette dernière dépend du diélectrique utilisé pour la fabrication de la ligne et donc la permittivité diélectrique du milieu ϵ_{eff} (2.1).

$$V_{\varphi} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.1)$$

Une ligne de transmission est considérée comme étant la juxtaposition d'une infinité de tronçons de ligne de longueur dx (fig.2.1).

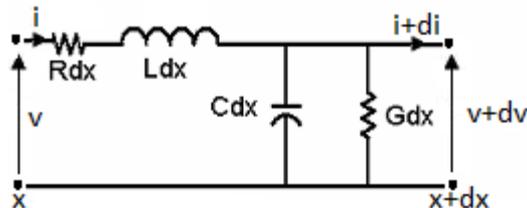


Figure.2. 1. Schéma modélisant une ligne de transmission

Quatre paramètres vont être détaillés, ils sont tous définis dans le livre de B.C. Waddel [2.1] :

R est la perte résistive du conducteur. Elle est exprimée en Ohm/m (Ω/m). Elle dépend des propriétés de la conductivité du métal (ρ). En plus, plus la largeur du conducteur est importante, plus R est faible, mais R augmente avec l'augmentation de la longueur. Cela est vérifié par la formule électrique de R (eq.2.2).

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.2)$$

Où :

- ρ est la résistivité du métal ($\Omega.m$),
- L est la longueur du métal (m),
- S est la section du métal (m^2)

La valeur de cette résistance R est aussi reliée à la radiation, c'est-à-dire que les lignes de champs électromagnétiques présents au voisinage de la ligne représentent des pertes liées à la dispersion. Il est à noter que ces pertes sont plus importantes quand les champs sont perturbés par un événement à proximité (tel que le contact d'un conducteur comme le toucher appliqué par le doigt humain).

L est la partie inductive de la ligne. Elle est exprimée en H/m. La valeur de L dépend des propriétés du métal et du voisinage de la ligne. Sa valeur dépend aussi de la géométrie de la ligne de transmission et sa formule électrique change en fonction du type de la ligne.

C est la partie capacitive de la ligne. Elle est exprimée en F/m. La capacité entre deux conducteurs, a une valeur qui peut être déterminée à partir de la surface du conducteur, l'épaisseur du substrat et sa permittivité. En effet, la valeur de C est plus importante pour une surface conductrice plus large, deux conducteurs plus proches et pour une permittivité relative ϵ_r plus grande (2.3).

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

Où :

- ϵ_0 est la permittivité de l'espace ($\epsilon_0=8,854.10^{-12}$ F/m),
- ϵ_r est la permittivité relative. Elle est aussi appelée constante diélectrique du substrat qui sépare les deux conducteurs,
- A est la surface des couches métalliques,
- d est la distance qui sépare les couches métalliques.

Pour les lignes de transmission planaires, les lignes de champs se développent lorsque les conducteurs sont décalés (fig.2.2). Dans ce cas (fig.2.2.b), la permittivité considérée est une permittivité effective (ϵ_{eff}) qui ne dépend pas uniquement de la permittivité relative du substrat (ϵ_r), mais aussi du milieu extérieur de la ligne. Une perturbation des lignes de champs change la valeur de ϵ_{eff} et par la suite la valeur de C.

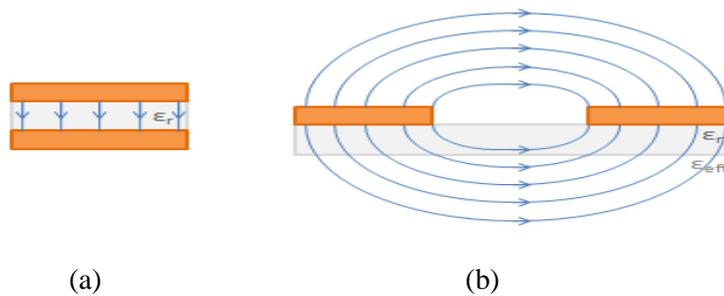


Figure.2. 2. Lignes de champs entre deux conducteurs

G est la conductance du diélectrique qui sépare les deux conducteurs de la ligne. Elle est exprimée en S (Siemens). Elle est exprimée comme suit :

$$G = \sigma \frac{S}{l} \quad (2.4)$$

- σ est la conductivité du diélectrique (S/m).
- l est l'épaisseur du diélectrique (m)
- S est la surface de contact des plaques conductrices (m²)

Ecrivons les lois régissant les tensions et les courants au sein de la ligne représentées par la fig.2.1.

L'équation régissant la tension s'écrit comme suit :

$$V(x, t) = R. dx. I(x, t) + L. dx. \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} + V(x + dx, t) \quad (2.5)$$

Donc,

$$-\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = R. I(x, t) + L. \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} \quad (2.6)$$

Et celle du courant est écrite comme suit :

$$I(x, t) = C. dx. \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} + G. dx. V(x, t) + I(x + dx, t) \quad (2.7)$$

Donc,

$$-\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = C. \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} + G. V(x, t) \quad (2.8)$$

En régime sinusoïdal, les deux équations (2.2) et (2.4) deviennent :

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} = -(R + j\omega L)I(x) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} = -(G + j\omega C)V(x) \quad (2.10)$$

En dérivant les deux équations (2.5) et (2.6) par rapport à x et en remplaçant respectivement les dérivées d'ordre 1, $\frac{\partial I(x)}{\partial x}$ et $\frac{\partial V(x)}{\partial x}$ par leurs expressions, on obtient les équations des télégraphistes:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - \gamma^2 V(x) = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} - \gamma^2 I(x) = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{où } \gamma^2 = (R + j\omega L)(G + j\omega C) \quad (2.13)$$

Ces équations admettent comme solutions respectives :

$$V(x) = V_i e^{-\gamma x} + V_r e^{\gamma x} \quad (2.14)$$

$$I(x) = I_i e^{-\gamma x} + I_r e^{\gamma x} \quad (2.15)$$

Où V_i , V_r , I_i et I_r sont des constantes d'intégration et γ est appelée constante de propagation qui peut se mettre sous la forme :

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.16)$$

Sa partie réelle α est un paramètre d'affaiblissement appelé constante d'atténuation exprimé en Neper par mètre (Np/m) et sa partie imaginaire est appelée constante de phase et exprimée en radians par mètre (rad/m).

Lorsque la ligne est sans pertes, les deux paramètres R et G sont négligeables. Dans ce cas, le modèle ne dépend que des paramètres L et C (fig.2.3). Les équations sont beaucoup plus simples. La constante de propagation d'une ligne idéale s'écrit simplement :

$$\gamma = \omega\sqrt{LC} \quad (2.17)$$

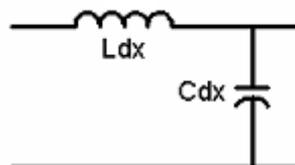


Figure.2. 3. Schéma modélisant une ligne de transmission idéale sans pertes

2.2. Impédance caractéristique d'une ligne de transmission

2.2.1. Définition et calcul à partir du modèle électrique

L'impédance caractéristique d'une ligne de transmission uniforme est le rapport des amplitudes de la tension et du courant se propageant tout au long de la ligne dans le cas où l'onde parcourt la ligne dans une seule direction et atteint sa fin dans l'absence de réflexion dans l'autre direction. Elle est déterminée à partir de la géométrie et du matériau de la ligne et elle ne dépend pas de la longueur de cette dernière. Elle est exprimée en Ohm (Ω).

Z_c peut s'exprimer en fonction des paramètres électriques d'une ligne de transmission comme suit :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (2.18)$$

Dans le cas d'une ligne sans pertes, l'impédance caractéristique est purement réelle :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.19)$$

2.2.2. Caractérisation et calcul à partir des paramètres S

Caractériser une ligne de transmission en paramètres S revient à la mesure des paramètres de réflexion et de transmission de cette dernière afin de décrire son comportement électrique. En effet, plusieurs propriétés peuvent être exprimées en utilisant les paramètres S comme le gain, les pertes en réflexion, le coefficient de réflexion ou de transmission, le rapport d'ondes stationnaires (ROS), etc.

Les paramètres S dépendent de la fréquence. Ils peuvent être mesurés à l'aide des analyseurs de réseaux vectoriels (VNA). Et, ils sont représentés sous une forme matricielle. Une modélisation d'une matrice S d'un quadripôle est représentée dans la figure 2.4.

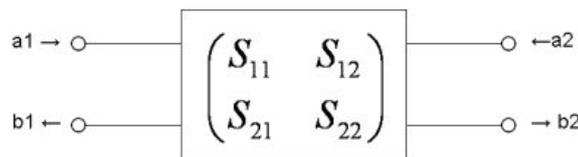


Figure.2. 4. Schéma modélisant un quadripôle

a_i et b_i sont des tensions complexes normalisées appelées aussi ondes de puissances incidentes (a_1 et a_2) et réfléchies (b_1 et b_2). Elles sont exprimées comme suit :

$$a_i = \frac{V_i + Z_c I_i}{2\sqrt{\text{Re}(Z_c)}} \quad (2.20)$$

$$b_i = \frac{V_i - Z_c^* I_i}{2\sqrt{\text{Re}(Z_c)}} \quad (2.21)$$

L'exposant * (dans l'équation 2.21) représente la valeur complexe conjuguée. Si l'impédance caractéristique de la ligne est réelle les équations deviennent :

$$a_i = \frac{V_i + Z_c I_i}{2\sqrt{Z_c}} \quad (2.22)$$

$$b_i = \frac{V_i - Z_c I_i}{2\sqrt{Z_c}} \quad (2.23)$$

Les quatre paramètres S sont définis comme suit :

- S_{11} la réflexion à l'entrée du dispositif,
- S_{21} la transmission de l'entrée vers la sortie,
- S_{22} la réflexion à la sortie du dispositif
- S_{12} la transmission inverse.

L'impédance caractéristique Z_c peut être mesurée à partir des paramètres S d'après [2.2] :

$$Z_c = Z_0 \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2.24)$$

Où Z_0 est l'impédance de l'instrument de mesure, elle est généralement égale à 50Ω (valeur standard).

2.2.3. Choix de la valeur standard 50Ω

En 1929, deux chercheurs travaillant pour Bell Labs, Lloyd Espenscheid et Herman Affel, ont expliqué le choix de deux valeurs standards d'impédance caractéristiques. 50Ω et 75Ω chacune pour une gamme d'applications bien définies. Ils se sont basés sur le graphe de la figure 2.5 qu'ils ont établi.

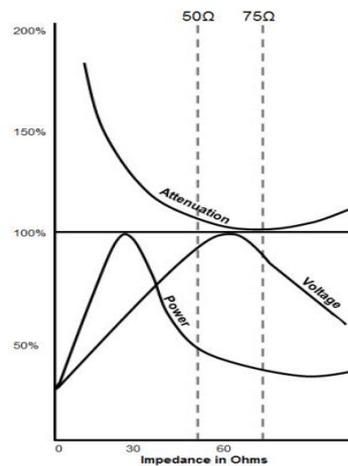


Figure.2. 5. Puissance, tension et atténuation d'un câble coaxial en fonction de l'impédance caractéristique [2.3]

L'objectif de ces chercheurs était d'envoyer des signaux RF transportant des milliers d'appels téléphoniques (à une fréquence de 4MHz) pour des centaines de miles. Ils avaient alors besoin d'un câble capable de porter un signal ayant une tension et une puissance importantes.

Pour un câble coaxial, le maximum de tension est atteint pour une impédance égale à 60Ω et, pour la puissance, le maximum est à 30Ω (fig.2.5). Cela veut dire qu'il n'existe pas une impédance unique

pour laquelle les deux paramètres sont maximaux. C'est pour cette raison qu'une valeur intermédiaire a été choisie. C'est la valeur 50Ω .

Dans le cas où le signal ne nécessite pas une grande puissance, comme dans des vidéos ou des antennes réceptrices, le graphe montre que le minimum d'atténuation est atteint à une valeur d'impédance égale à 75Ω , c'est alors la seconde valeur standard choisie pour ce type d'applications.

Dans ce travail, 50Ω sera l'impédance caractéristique à laquelle la ligne de transmission à réaliser sera adaptée. C'est la valeur parfaite pour qu'elle soit connectée via les câbles coaxiaux (50Ω), aux autres circuits imprimés ou à l'instrument de mesure (VNA) sans aucun problème d'adaptation.

2.2.4. Notion d'adaptation

Une ligne de transmission est utilisée pour la propagation d'une puissance d'énergie électrique qui véhicule un signal. Une bonne transmission de cette information nécessite un transfert de puissance qui est fortement lié à l'adaptation des impédances à l'entrée et à la sortie de ligne. En d'autres termes, l'impédance des terminaisons de la ligne doit être égale à son impédance caractéristique (Z_c). En plus, Z_c doit être constante sur toute la longueur de la ligne. C'est ce qui est appelée adaptation d'impédance en puissance. Si cette adaptation n'est pas vérifiée, le transfert de puissance ne sera pas total et une partie sera réfléchi.

Le coefficient de réflexion à l'entrée de la ligne est défini comme étant le rapport de l'onde réfléchi V_r par l'onde incidente V_i (2.14) :

$$\Gamma_{in} = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.25)$$

2.2.5. Effet électromagnétique du doigt

Dans le modèle électrique de la ligne, les valeurs des paramètres R, L et C dépendent des champs de proximité. Par exemple, la valeur de la capacité dépend de la permittivité effective (ϵ_{eff}) qui, elle, dépend du milieu qui entoure la ligne.

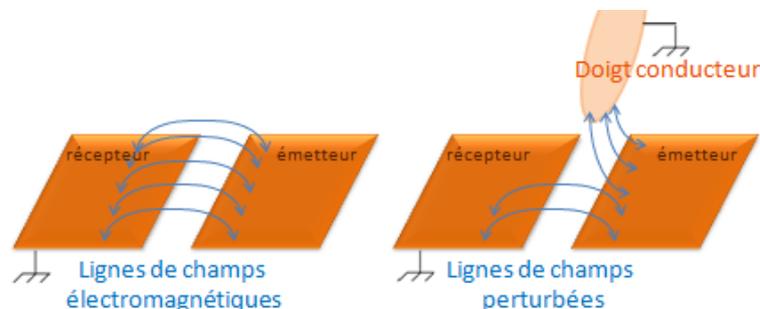


Figure.2. 6. Lignes de champs électromagnétiques sans et avec toucher

La perturbation des lignes de champs par un conducteur tel que le doigt (fig.2.6) entraîne alors un changement dans les valeurs de ces paramètres. L'impédance caractéristique de la ligne Z_c , ayant une valeur qui dépend des paramètres électriques de la ligne (2.17) change alors localement.

Cette désadaptation locale de la ligne due au changement local de la valeur d'impédance caractéristique à cause de la présence du doigt engendre la création d'une onde réfléchie à la position exacte du toucher comme le montre la figure 2.7. C'est la base du principe de détection et de localisation associé à la dalle tactile proposé.

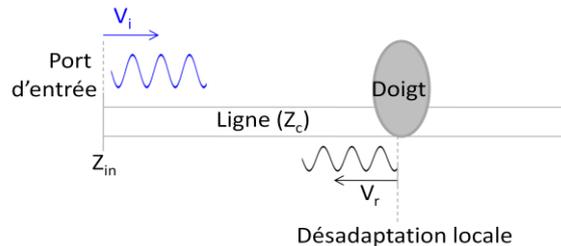


Figure.2. 7.Désadaptation locale de la ligne par le toucher

Dans le cas d'une désadaptation, une onde réfléchie parcourt la ligne dans le sens inverse du signal injecté. L'impédance à l'entrée de la ligne et notée Z_{in} . C'est une impédance liée au coefficient de réflexion à l'entrée de la ligne Γ_{in} (eq2.25) et exprimée comme suit :

$$Z_{in} = Z_c \frac{1+\Gamma_{in}}{1-\Gamma_{in}} = Z_c \frac{V_i+V_r}{V_i-V_r} \quad (2.26)$$

L'impédance mesurée à l'entrée de la ligne (Z_{in}) est égale à son impédance caractéristique Z_c si la ligne ne présente pas de réflexion ($V_r = 0$).

2.3. Choix du type de ligne

2.3.1. Critères de choix

Dans cette partie, différents types de lignes de transmission sont présentés. Leurs structures et leurs paramètres physiques sont exposés. L'objectif est de choisir le type de la ligne de transmission à réaliser. Cette ligne constitue la dalle tactile qui doit satisfaire trois critères de base :

- la sensibilité :

Les modèles électromagnétiques des lignes sont exploités pour l'évaluation de la sensibilité. La détection du toucher se traduit par la perturbation des lignes de champs (fig.2.6).

- la grande surface :

Une bonne transmission avec les moindres pertes est obligatoire.

- la simplicité de conception, réalisation et intégration.

Une étude comparative est élaborée en fonction de ces trois critères de choix.

2.3.2. Types de lignes de transmission

2.3.2.1. Câble coaxial



Figure.2. 8. Structure d'un câble coaxial

L'élément central d'un câble coaxial est un conducteur en cuivre qui assure la transmission des données. Il est composé d'un seul brin en cuivre à faible flexion ou de plusieurs brins torsadés pour les applications de câbles souples. Ce dernier est entouré d'un isolant, qui lui-même est entouré d'un matériau conducteur maillé qui sert de masse (fig.2.8). L'isolant a pour rôle la séparation de la tresse du câble central pour éviter le contact entre les deux et donc les interactions électriques provoquant un court-circuit. Le signal utile est égal à la différence de tension entre ces deux conducteurs. Cet ensemble est recouvert d'une gaine isolante qui protège le câble de l'environnement (tensions extérieures, interférences, poussière) et elle est habituellement en caoutchouc.

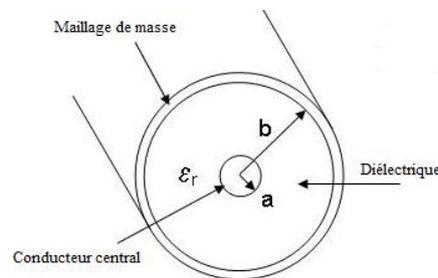


Figure.2. 9. Coupe transverse d'un câble coaxial

Au niveau du câble coaxial (fig.2.9), deux diamètres peuvent être définis. Un diamètre intérieur du conducteur central a et un autre b qui correspond au diamètre du diélectrique.

L'impédance caractéristique d'un câble coaxial ne dépend que de ses dimensions et de sa vitesse de phase V_ϕ .

$$Z_c = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot V_\phi \cdot \log\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.27)$$

Pour évaluer la sensibilité du câble coaxial à l'environnement extérieur, les lignes de champ électromagnétiques peuvent être considérées. Elles sont représentées dans la Figure 2.10.

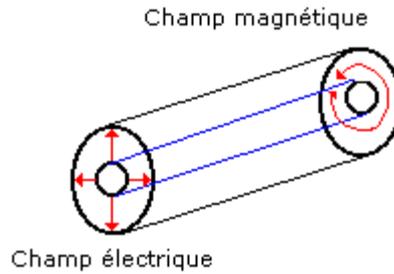


Figure.2. 10.Champs électromagnétiques au sein d'un câble coaxial [2.4]

Les lignes du champ électrique (ou bien même celles du champ magnétique) sont confinées dans le diélectrique (fig.2.10), entre le conducteur principal et le maillage de masse. Elles ne dépassent pas la gaine protectrice extérieure.

Un critère principal n'est pas satisfait par le câble coaxial. C'est la sensibilité qui est basée sur la perturbation des lignes de champ.

2.3.2.2. Circuits planaires imprimés

Pour les lignes planaires le substrat n'entoure pas forcément le conducteur principal qui transporte l'information utile. Ce dernier est aussi en contact avec l'air et donc l'environnement extérieur. C'est pour cette raison que les deux milieux, diélectrique (de permittivité relative ϵ_r) et air, sont remplacés par un seul milieu effectif caractérisé par une constante diélectrique appelée la permittivité effective ϵ_{eff} (fig.2.2).

L'impédance caractéristique dépend de cette constante du milieu effectif. Par conséquent, la sensibilité de la ligne est reliée à sa désadaptation locale due à une variation dans la valeur de ϵ_{eff} suite à la perturbation des lignes de champ.

Les lignes planaires présentent alors une sensibilité vis-à-vis du milieu extérieur. Quelques types sont étudiés ci-après.

2.3.2.2.1. Ligne micro-ruban (Microstrip)

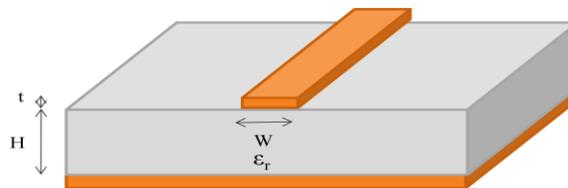


Figure.2. 11.Coupe transverse d'une ligne micro-ruban

La ligne micro-ruban (en anglais « microstrip ») est beaucoup utilisée grâce à sa simplicité et sa facilité de réalisation et d'intégration dans les systèmes micro-ondes.

Cette ligne (fig.2.11) est constituée de l'ensemble de deux conducteurs, un ruban conducteur de largeur W et d'épaisseur t , disposé sur la face supérieure d'un substrat de permittivité relative ϵ_r et une

face inférieure totalement métallisée qui représente le plan de masse. Son impédance caractéristique dépend de ces propriétés qui caractérisent le matériau conducteur utilisé ainsi que le substrat [2.1].

Du point de vue électromagnétique, la ligne micro-ruban est le siège d'une onde qui se propage en mode quasi-TEM (Transverse ElectroMagnétique). Les champs électriques et magnétiques sont perpendiculaires à l'axe de la ligne suivant lequel s'effectue la propagation, autrement dit, les composantes E_z et H_z sont nulles. Les lignes des deux champs électrique et magnétique sont représentées par la Figure 2.12.

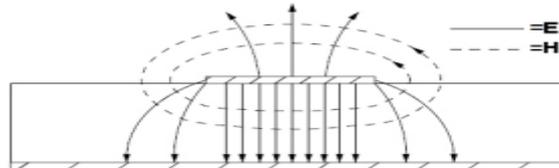


Figure.2. 12. Champs Electromagnétiques pour une ligne micro-ruban [2.5]

En considérant la sensibilité de la ligne le premier critère de choix, les lignes de champ qui comptent sont celles qui sont présentes dans l'air.

Au sein de la ligne micro-ruban (fig.2.12), la plupart des lignes de champs électriques sont confinées dans le substrat, mais quelques unes sont mal confinées, elles se propagent aussi dans l'air, celles-ci peuvent provoquer des interactions externes. Mais, ces interactions ne sont pas importantes, vu le pourcentage faible de ces lignes par rapport à celles confinées dans le substrat.

Donc, du point de vu sensibilité, la ligne micro-ruban n'est pas le meilleur choix.

2.3.2.2.2. Ligne coplanaire (Coplanar Waveguide CPW)

La ligne de transmission coplanaire, dite aussi guide coplanaire et notée CPW (Coplanar Waveguide) est un élément très utilisé de nos jours dans la conception des circuits intégrés. Ce type de ligne a été proposé par Cheng P.Wen en 1969 comme une alternative aux lignes micro-ruban [2.6].

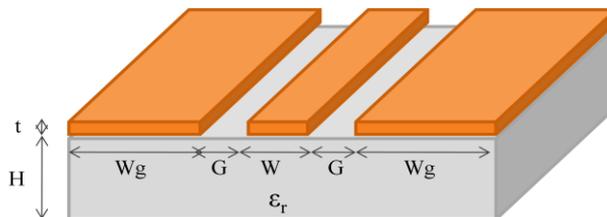


Figure.2. 13. Coupe transverse d'une ligne coplanaire (CPW)

La ligne coplanaire (fig.2.13) est composée de trois rubans métalliques imprimés sur le même plan. Le conducteur central de largeur W véhicule le signal et les deux rubans latéraux de largeur W_g servent de plans de masse. Les trois conducteurs sont séparés par des fentes coplanaires de largeur G appelées aussi « Gap ». Ces conducteurs ont la même épaisseur t et ils sont disposés sur un substrat d'épaisseur H .

La première étape dans le calcul de l'impédance caractéristique de la ligne coplanaire consiste à la détermination de sa permittivité effective (2.28) [2.1].

$$\epsilon_{eff} = 1 + (\epsilon_r - 1) \cdot \frac{\frac{K(k_2)}{K'(k_2)}}{\frac{K(k_1)}{K'(k_1)} + \frac{K(k_2)}{K'(k_2)}} \quad (2.28)$$

Où k_1 et k_2 sont des constantes exprimées respectivement par les équations (2.29) et (2.30) :

$$k_1 = \frac{w}{w+2G} \quad (2.29)$$

$$k_2 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi w}{4h}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi(w+2G)}{4h}\right)} \quad (2.30)$$

Et les deux fonctions $K(k)$ et $K'(k)$ représentent respectivement l'intégrale elliptique complète du premier degré et son complémentaire. Le rapport des deux est exprimé dans l'équation (2.31).

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \begin{cases} \frac{\pi}{\ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}}\right)} & \text{si } 0 \leq k \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{\ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right)}{\pi} & \text{si } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1 \end{cases} \quad (2.31)$$

avec $k' = \sqrt{1 - k^2}$

Enfin, l'impédance caractéristique s'écrit :

$$Z_c = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{1}{\frac{K(k_1)}{K'(k_1)} + \frac{K(k_2)}{K'(k_2)}} \quad (2.32)$$

Les lignes de champ électriques se dirigent du conducteur principal vers le plan de masse comme dans les deux cas présentés précédemment. Mais, puisque dans la configuration de la ligne CPW, ces derniers sont imprimés sur la même surface, une grande partie des lignes de champ électrique est présente dans l'air (fig.2.14).

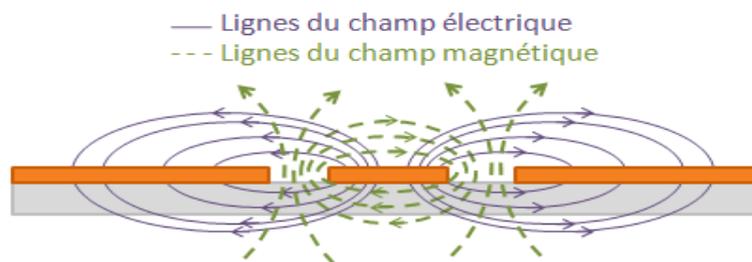


Figure.2. 14. Champs électromagnétiques pour une ligne coplanaire

Pour la configuration d'une ligne coplanaire, un événement extérieur, dans le voisinage de la ligne imprimée peut perturber facilement les lignes de champ électromagnétique.

2.3.2.2.3. Ligne à fente (slot-line)

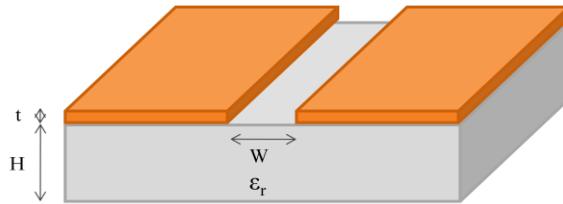


Figure.2. 15. Coupe transverse d'une ligne à fente (« Slotline »)

La ligne à fente consiste en un substrat ayant une face supérieure conductrice présentant une fente de largeur W dans sa métallisation (Figure 2.15).

Son plus grand inconvénient c'est sa nature dispersive comparée aux autres types de lignes planaires à cause de la largeur importante du conducteur qui conduit l'information.

Dans une ligne à fente, la largeur W détermine l'impédance caractéristique. Z_c augmente avec l'augmentation de W et elle est très peu sensible à l'épaisseur du substrat (équation de Z_c , [2.1])

Le mode de propagation est principalement transverse électrique (TE) et les lignes de champ peuvent être représentées comme le montre la Figure 2.16.

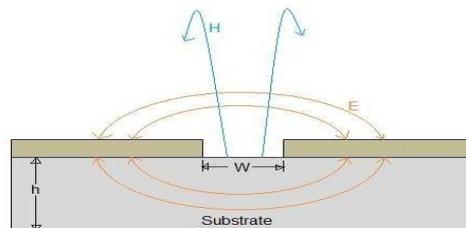


Figure.2. 16. Lignes de champs électromagnétiques au niveau d'une ligne à fente [2.7]

Comme une ligne CPW, les lignes de champ d'une « slotline » peuvent être facilement perturbées par un événement à la proximité du conducteur. Mais son caractère très dispersif empêche de choisir ce type de ligne, car, dans ce cas, le critère d'avoir une grande surface avec une longue ligne imprimée ne peut pas être satisfait.

2.3.2.2.4. Guide à ruban ou « stripline »

La « stripline » nécessite la présence de trois couches de conducteurs où le conducteur interne est appelé « conducteur chaud », c'est lui qui transfère le signal. Il est placé entre deux plans métallisés qui représentent les plans de masse (fig.2.17).

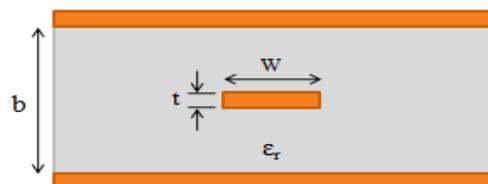


Figure.2. 17. Coupe transverse d'une « stripline »

Le conducteur principal de largeur W est plongé dans un diélectrique homogène et isotrope de permittivité relative ϵ_r . Ce diélectrique ne peut pas être appelé substrat car il entoure le « conducteur chaud » de la ligne.

La ligne stripline est surtout utilisée dans les circuits multicouches parce qu'elle peut transmettre le signal entre les différentes couches.

L'impédance caractéristique d'une « stripline » dépend de la structure transversale de la ligne ainsi que de la constance diélectrique [2.1].

Les champs électromagnétiques au sein d'un guide à ruban sont présentés dans la Figure 2.18. Son mode de propagation est TEM.

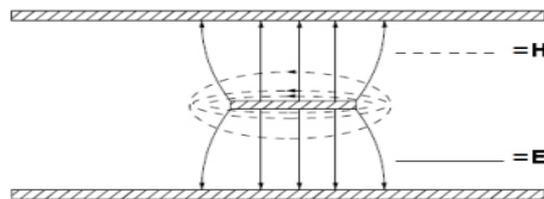


Figure.2. 18. Champ électromagnétiques pour une « stripline » [2.5]

Toutes les lignes de champ sont confinées dans le diélectrique, entre le conducteur principal et les deux plans de masse. Aucune ligne de champ ne dépasse les plans métallisés de masse. Ces lignes ne peuvent pas être perturbées par la présence du toucher sur l'une de ses surfaces métallisées.

Mais, cette ligne peut être sensible à la pression du toucher si le diélectrique s'écrase. C'est-à-dire, si la nature de ce dernier est élastique, une déformation mécanique peut être créée par le toucher. Et dans ce cas il est détecté.

2.3.3. Comparaison entre les différents types et choix

Trois critères sont fixés pour le choix d'un seul type de ligne de transmission : la sensibilité, les faibles pertes et la simplicité. Les différentes lignes présentées sont classées dans un tableau comparatif (tab.2.1) en fonction de ces critères pour l'élaboration d'un meilleur choix.

Critère	Sensibilité	Pertes	Simplicité de conception
Type de ligne			
Câble coaxial	Sensibilité nulle : Toutes les lignes de champ sont confinées dans le substrat.	Faibles	-
Ligne micro-ruban	Sensibilité moyenne : Quelques lignes de champ peuvent être perturbées mais la plupart des lignes est confinée dans le substrat.	Faibles	Excellente
Ligne CPW	Excellente sensibilité : Lignes de champ très sensibles aux perturbations voisines.	Faibles	Excellente
Ligne à fente	Excellente sensibilité : Lignes de champ très sensibles aux perturbations voisines.	Elevées : Grande dispersion due à la largeur importante du conducteur principal.	Excellente
Guide à ruban « stripline »	Sensibilité mécanique (à la pression) : Lignes de champ non sensibles. Elles sont confinées dans le substrat. Mais dans le cas d'un diélectrique élastique, la ligne est sensible à la pression.	Faibles	Moyenne : Conducteur enterré dans le diélectrique entre deux plans de masse.

Tableau.2. 1. Tableau comparatif des lignes de transmission en fonction des critères de choix

La sensibilité de la ligne de transmission est le premier critère à satisfaire. Les deux types de lignes de transmission ayant les lignes de champ les plus sensibles aux événements de voisinage sont la ligne CPW et la ligne à fente. Mais la deuxième ne satisfait pas le second critère fixé (faibles pertes). Elle ne peut pas être utilisée dans le cas d'une grande surface, par conséquent, elle est écartée.

Concernant le guide à ruban, toutes ses lignes de champ sont confinées dans le substrat. Par conséquent, elles ne sont pas sensibles au toucher. Mais ce qui est intéressant, c'est que cette ligne peut être sensible à une pression dans le cas où le diélectrique est mou. Dans ce cas, c'est une sensibilité mécanique qui est assurée par la surface tactile. Avec un conducteur enterré, la réalisation

de cette ligne n'est pas simple, mais elle présente l'avantage d'être protégée. Le doigt n'est pas en contact direct avec le conducteur.

Pour des raisons de simplicité de conception et aussi pour assurer la meilleure sensibilité, nous avons opté pour la ligne CPW.

2.4. Conception de la dalle tactile

2.4.1. Conception d'un premier prototype

2.4.1.1. Outils de conception

Pour la conception de la ligne de transmission, le logiciel ADS (Advanced Design System) de Keysight est utilisé. Il fournit les outils nécessaires qui permettent de bien dimensionner n'importe quel type de ligne de transmission afin d'assurer son adaptation à une impédance caractéristique donnée.

2.4.1.1.1. Calculateur « LineCalc »

L'outil « Linecalc » du logiciel ADS implémente les équations théoriques de Wadell [2.1] qui permettent de calculer l'impédance caractéristique d'une ligne à partir de ses dimensions ainsi que des paramètres du substrat et du conducteur.

Il peut être utilisé dans les deux sens. C'est-à-dire, soit déterminer Z_c pour des dimensions données, soit déterminer les dimensions permettant d'avoir un Z_c donné.

L'interface de l'outil « LineCalc » (fig.2.19), permet de choisir le type de la ligne et ensuite d'introduire les paramètres du substrat et du conducteur dont dépend le calcul de Z_c .

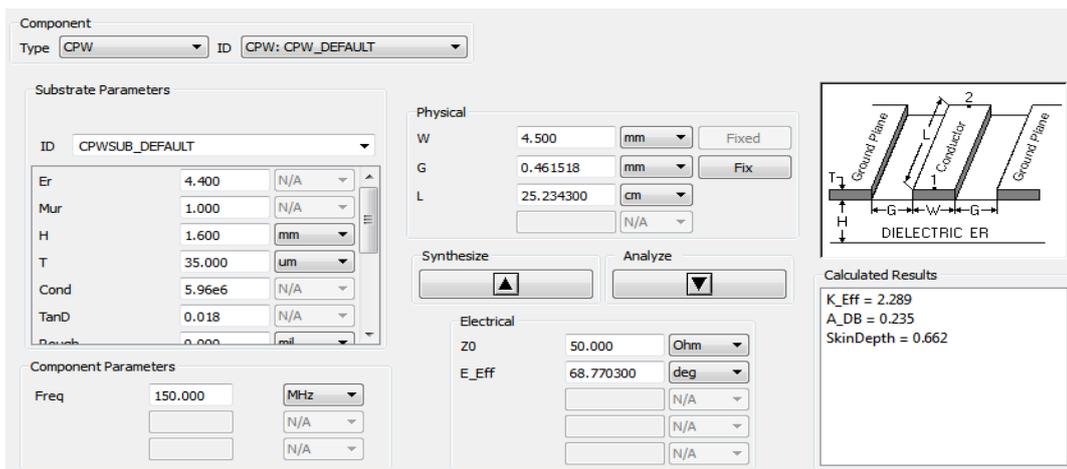


Figure.2. 19. Interface « LineCalc » d'ADS

Mais, ce calculateur, ainsi que les équations de Wadell restent théoriques. Ils sont uniquement basés sur les paramètres du conducteur et du diélectrique. Ils ne tiennent pas compte ni de la forme de la ligne ni de l'effet des radiations électromagnétiques sur son adaptation.

2.4.1.1.2. Simulateur électromagnétique « Momentum »

Un autre outil du même logiciel (ADS) appelé « Momentum » est utilisé pour les simulations électromagnétiques (EM).

C'est un simulateur qui est basé sur la méthode des moments. Il permet de calculer les paramètres S, les courants de surface, les champs EM pour différents circuits planaires comme les lignes micro-ruban, CPW, stripline,... tous présents dans la bibliothèque associée au simulateur. Les trous métallisés (vias) et les ponts connectant différentes couches sont aussi réalisables afin de simuler les circuits multicouches.

« Momentum » fournit, également, une interface qui modélise la ligne en 3D qui permet de définir le substrat ainsi que le conducteur en introduisant leurs paramètres.

Pour une ligne CPW, les simulations avec cet outil permettent de choisir la largeur des plans de masse W_g qui n'est pas définie dans le modèle théorique (fig.2.19) où la ligne coplanaire est considérée à plans de masse de largeur infinie.

2.4.1.2. Processus de conception

2.4.1.2.1. Choix des dimensions

La première étape de conception consiste à introduire les paramètres de la ligne ainsi que son substrat (tab.2.2) à l'outil de calcul « LineCalc » pour une ligne de type « CPW ».

Le paramètre « TanD » est la tangente de pertes qui correspond à la dissipation diélectrique dans le substrat.

Conducteur : Cuivre (Cu)		
Paramètre	Valeur	Définition
T	35 μm	Epaisseur
C	$59,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$	Conductivité
Substrat : FR4		
Paramètre	Valeur	Définition
ϵ_r	4,4	Permittivité relative
H	1,6 mm	Epaisseur
TanD	0,018	Facteur de pertes

Tableau.2. 2. Paramètres de la plaque Cu/FR4

Une ligne coplanaire est caractérisée par deux dimensions transversales : W et G. L'une des deux doit être fixée et « LineCalc » calcule l'autre de façon à obtenir Z_c égale à 50Ω .

2.4.1.2.2. Design de la ligne

La ligne à réaliser est une ligne coplanaire de longueur 25 cm à plans de masse de largeur finie. Pour la dessiner, le type de ligne «Maclin3» est choisi. Il est composé de trois conducteurs parallèles. Le ruban central correspond au conducteur central de la CPW et les deux autres sont les plans de masse.

Les dimensions W et G sont choisies en fonction des résultats eus avec le calculateur « LineCalc ».

Une nouvelle variable qui correspond à la largeur des deux plans de masse W_g se rajoute. Elle va être fixée à partir de son influence sur la valeur de Z_c . La ligne dessinée est représentée dans la Figure 2.20.



Figure.2. 20. Dessin de la ligne coplanaire droite

Les ports (de 1 à 6 sur la Figure 2.20) sont définis de façon à avoir une transmission du signal du port 1 vers le port 2. Les ports 3, 4, 5, 6 sont connectés à la masse.

Un substrat est associé à ce design. Il est basé sur les paramètres électriques d'une feuille Cu/FR4 (tab.2.2).

2.4.1.2.3. Evaluation des résultats

Pour caractériser une ligne de transmission, il s'agit de déterminer ses quatre paramètres S pour ensuite calculer son impédance caractéristique. Les paramètres S peuvent être simulés avec « Momentum ». Pour leur évaluation deux règles sont suivies.

Pour une meilleure adaptation de la ligne :

- Les paramètres de réflexion S_{11} et S_{22} diminuent. (Théoriquement la réflexion est nulle pour une ligne parfaitement adaptée)
- Les paramètres de transmission S_{21} et S_{12} augmentent pour s'approcher de la valeur 0dB. (Une meilleure transmission du signal est assurée quand la ligne est mieux adaptée)

La courbe de Z_c est également représentée en se basant sur l'équation (2.24). Ce paramètre informe clairement sur l'adaptation de la ligne.

En faisant la conception de la ligne, l'influence de deux paramètres est étudiée: G et W_g .

2.4.1.3. Simulations et résultats

2.4.1.3.1. Variation du gap G

Les dimensions obtenues par « LineCalc » pour une ligne CPW d'impédance caractéristique 50Ω sont représentées par le tableau (tab.2.3)

Paramètre	Valeur (mm)
W	4.5
G	0.46

Tableau.2. 3. Dimensions d'une ligne CPW ($Z_c=50\Omega$), outil « Linecalc »

Le premier paramètre affiné par les simulations EM est le Gap (G). Les résultats de simulations EM montrent que la valeur déterminée avec le calculateur « LineCalc » n'est pas suffisamment précise pour donner une impédance caractéristique de 50Ω dans le cas d'une ligne CPW à plans de masse finis $W_g=5\text{mm}$ (fig.2.3). La valeur de G est modifiée finement jusqu'à obtenir une meilleure adaptation.

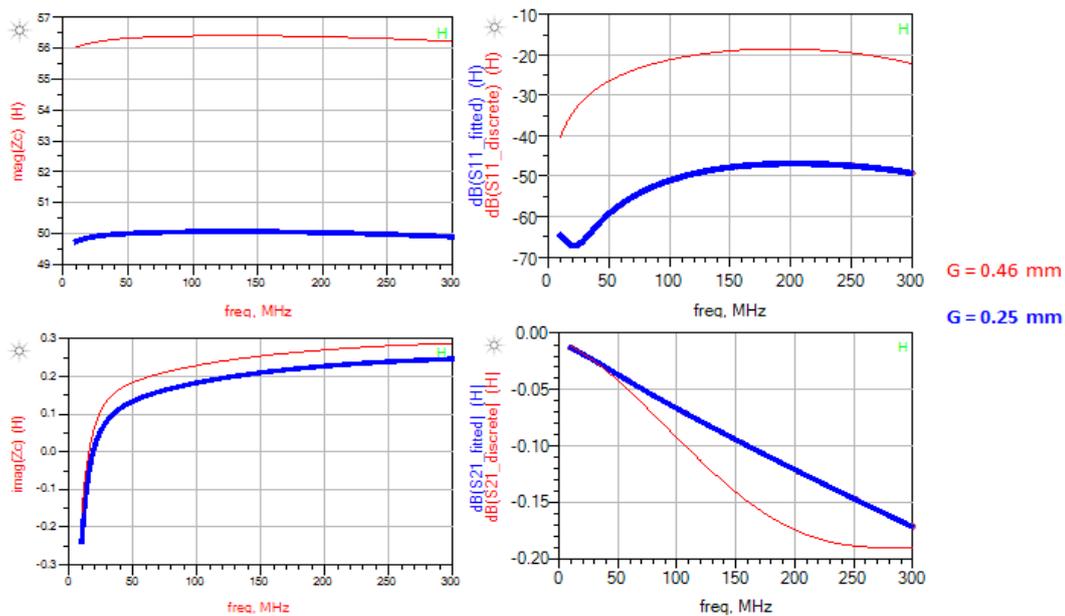


Figure.2. 21. Z_c et paramètres S_{11} et S_{21} en fonction de la fréquence pour deux valeurs de G.

La Figure 2.21 montre qu'une petite variation, de 0.21 mm, de la valeur de G améliore considérablement les résultats. Le paramètre S_{11} diminue considérablement et une légère augmentation du S_{21} est perçue. L'amélioration au niveau des deux paramètres S engendre une meilleure adaptation de la ligne. La valeur de l'impédance caractéristique passe, effectivement, d'une valeur de 56Ω (dans le cas où $G=0.46\text{mm}$) à 50Ω (dans le cas où $G=0.25\text{mm}$).

Suite à ces simulations, la valeur $G=0.25\text{mm}$ est retenue. Pour cette valeur de G, la partie suivante traite l'effet du changement de la largeur de masse sur l'adaptation de la ligne.

2.4.1.3.2. Effet de variation de la largeur des plans de masse (W_g)

Une première gamme (valeurs faibles) de W_g est testée (tab.2.4), les valeurs de W et G étant fixes. L'effet de la variation de W_g est étudié par la représentation des paramètres S_{11} et S_{21} ainsi que Z_c (en partie réelle et imaginaire) suite à son calcul.

	Dimension	Valeur (mm)			
Valeurs fixes	W	4.5			
	G	0.25			
Valeur variable	W_g	0.2	0.3	0.4	1

Tableau.2. 4. Paramètres de simulation (Valeurs faibles de W_g)

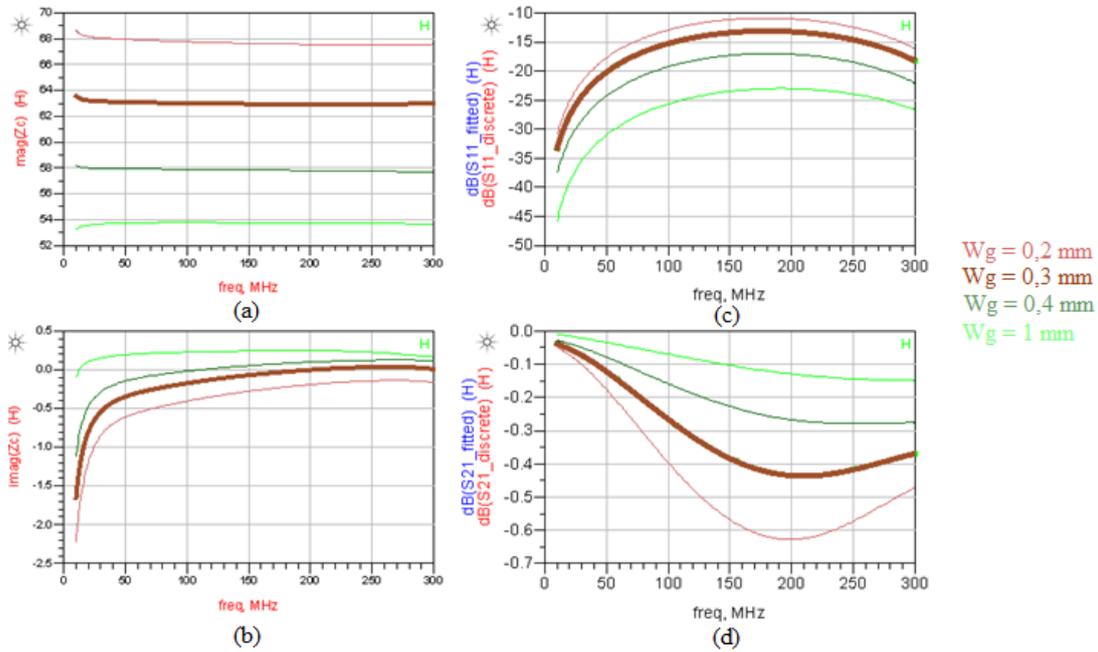


Figure.2. 22. Z_c et paramètres S_{11} et S_{21} en fonction de la fréquence, W_g de 0,2 mm à 1mm.

La Figure 2.22 montre que, pour cette gamme de valeurs, plus la valeur de W_g augmente, plus la courbe de Z_c s'approche de la valeur 50 Ω . C'est un résultat direct du fait que les paramètres S s'améliorent avec l'augmentation de W_g .

Pour avoir une idée plus claire sur le comportement de Z_c en fonction de W_g , une autre gamme de valeurs plus large est testée (tab.2.7). Les résultats de simulation sont représentés par la fig.2.23.

	Dimension	Valeur (mm)						
Valeurs fixes	W	4.5						
	G	0.25						
Valeur variable	W_g	1.5	2	2.5	3	4	5	7

Tableau.2. 5. Paramètres de simulation (Valeurs de W_g de 1,5mm à 7mm)

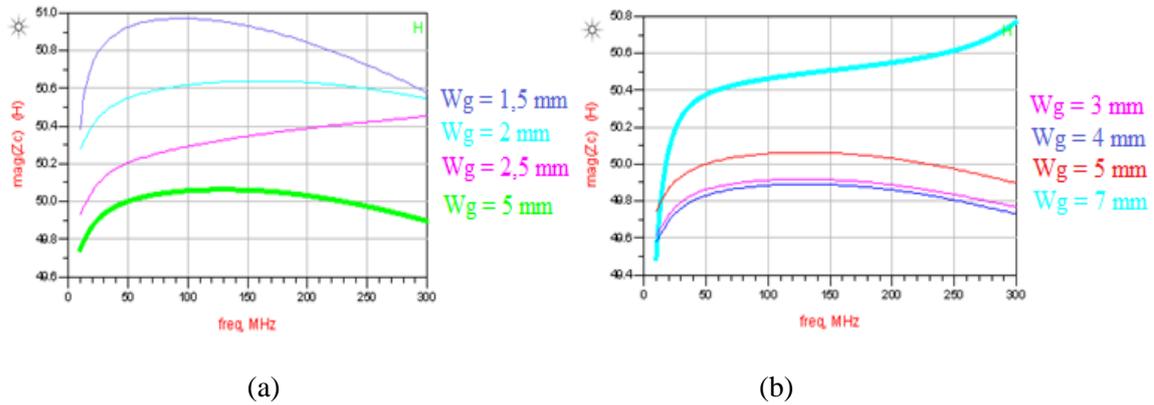


Figure.2. 23. Z_c et paramètres S_{11} et S_{21} en fonction de la fréquence pour W_g de 1,5mm à 7mm.

Dans la Figure 2.23.a, la valeur de Z_c s'approche de 50Ω lorsque W_g augmente.

Pour des valeurs de W_g égales à 3mm et 4mm, la valeur de Z_c descend légèrement en dessous de 50Ω (Figure 2.23.b) mais elle augmente ensuite pour atteindre une valeur moyenne de $50,5\Omega$ pour une largeur de masse W_g égale à 7mm.

Z_c est égale à 50Ω pour uniquement deux valeur de W_g . La première est 5mm et la deuxième est comprise entre 2,5 et 3mm.

A partir de ces différentes simulations (fig.2.22 et fig2.23), un graphe du comportement de Z_c en fonction de W_g est tracé dans la Figure 2.24.

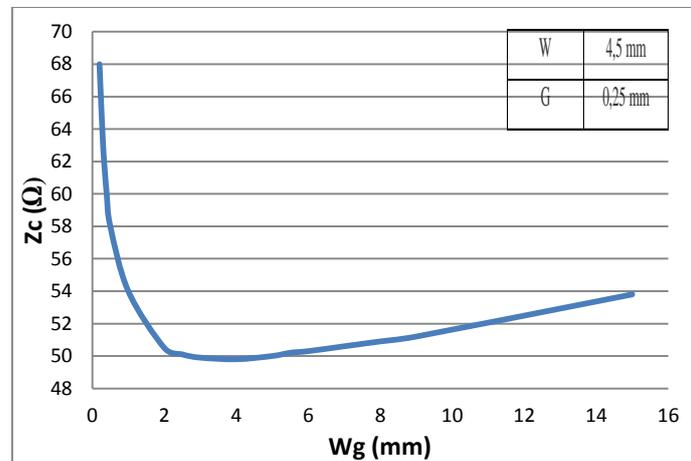


Figure.2. 24. Courbe de Z_c en fonction de W_g

Ce graphe montre que la largeur des plans de masse influence la valeur de Z_c . La Figure 2.24 correspond aux dimensions $W=4.5$ mm et $G=0.25$ mm pour lesquelles Z_c est égale à 50Ω pour les deux valeurs de W_g : 2,8 mm et 5mm.

Il est préférable que la valeur de W_g soit supérieure à la largeur du conducteur principal pour avoir un champ électrique plus étendu dans l'espace et donc une ligne plus sensible au toucher. Et, puisque le conducteur principal a une largeur W égale à 4,5mm, la largeur des plans de masse 5mm est retenue.

Pour conclure, les dimensions de la ligne coplanaire à réaliser sont présentées par le tableau 2.6, et la courbe simulée de son impédance caractéristique en fonction de la fréquence sur l'intervalle de travail [10,300] MHz est représentée par la Figure 2.25.

Paramètre	Valeur (mm)
W	4.5
G	0.25
W_g	5

Tableau.2. 6. Dimensions retenues pour la CPW suite aux simulations EM

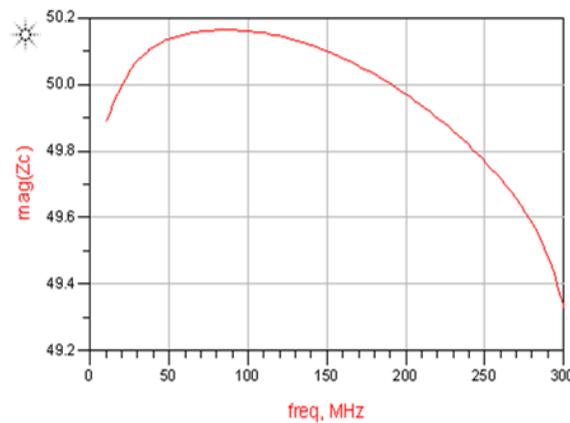


Figure.2. 25. Courbe de Zc en fonction de la fréquence pour la ligne coplanaire choisie.

2.4.2. Structure complète de la dalle

Pour rendre toute une surface sensible au toucher, elle doit être toute couverte par la ligne de transmission. Il faut alors trouver le dessin le mieux adapté qui assure, d'une part, une bonne propagation du signal RF sans réflexion parasite, et d'autre part, un maximum de couverture de la surface tactile. Le dessin de la ligne conditionne également la résolution de la localisation sur la dalle.

2.4.2.1. Structure serpentín

La forme choisie est un serpentín qui peut facilement s'adapter pour couvrir le maximum d'une surface rectangulaire (fig.2.29).



Figure.2. 26. Modèle de ligne serpentín

La forme en serpentín de la ligne de transmission est clairement inhomogène. Pour limiter les problèmes de dispersion, la bande de fréquence de travail est choisie inférieure à 300MHz.

2.4.2.2. Coudes

L'uniformité de la propagation conditionne la précision de la localisation du toucher. Une attention spéciale est portée aux coudes. Plusieurs configurations d'angles sont utilisables pour remplacer un simple angle droit de 90° (fig.2.27.a) qui peut être vu comme une discontinuité géométrique par le signal qui parcourt la ligne.

Les angles mitrés (fig.2.27.b) sont conçus, par exemple, pour résoudre ce problème de discontinuité.

Mais la meilleure option, efficace et facile à concevoir, reste toujours l'angle courbé représenté dans la figure 2.27.c.

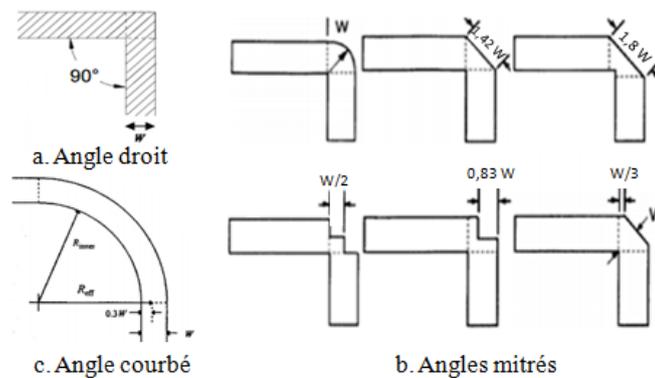


Figure.2. 27. Configurations de conception d'angles [2.5]

2.4.2.3. Espacement entre bouts de ligne

Un autre paramètre très important à considérer est l'espacement e (fig.2.26) qui sépare deux bouts de ligne simultanément. Cet espacement doit être assez grand pour qu'un doigt ne couvre pas deux lignes, car dans ce cas sa localisation sera impossible, et assez petit pour assurer une bonne précision de localisation suivant l'axe des y (fig.2.26). Par ailleurs, du point de vue radiofréquence, cet espacement doit être bien étudié pour ne pas avoir un couplage entre les différentes portions de la ligne, c'est un critère à vérifier lors de la simulation.

2.5. Substrats souples

La dalle doit à terme être réalisée sur un substrat souple.

Deux substrats disponibles satisfont à cette condition : Le polyimide (Kapton) et le polyester (PET : Polyéthylène Terephthalate). Ils seront détaillés dans cette partie.

2.5.1. PET (Polyéthylène Terephthalate)

Le PET est issu du pétrole partiellement transformé avec l'oxygène. Il est composé de longues chaînes de molécules chimiques. Refroidi brutalement, le PET est amorphe et transparent. C'est un polyester qui doit son nom à la composition « poly » plusieurs et « ester » le type de liaison.

Le PET est utilisé dans diverses applications. Quelques exemples intéressants peuvent être mentionnés.

En effet, le PET permet de créer des terminaux à écran OLED (Organic Light Emitting Diode) flexibles, voire pliables, des peintures électroniques ou encore des panneaux photovoltaïques pouvant prendre toutes sortes de formes. Ces projets ont en commun l'utilisation d'électrodes qui doivent être à la fois transparentes et flexibles. Les OLEDs réguliers sont d'habitude fabriqués sur un substrat en verre. Remplacer le verre par le polyester PET, l'OLED devient compatible pour les applications souples. Un exemple d'OLED souple est représenté par la figure 2.31.

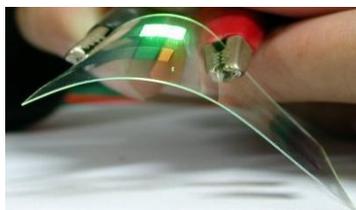


Figure.2. 28. OLED souple (Merck group)

Par ailleurs, l'utilisation de l'oxyde d'indium d'étain (ITO) est une solution technique très répandue pour la réalisation d'écrans tactiles souples. Pour conserver ses propriétés de transparence optique ainsi que sa flexibilité, le substrat sur lequel l'ITO est placé est le PET, dans plusieurs écrans tactiles résistifs et capacitifs [1.24, 1.26].

Une solution qui est basée sur un substrat PET est proposée pour la réalisation d'une ligne de transmission souple. C'est une feuille Aluminium/PET, dont toutes les caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 2.7.

Conducteur : Aluminium (Alu)		
Paramètre	Valeur	Définition
T	9 μm	Epaisseur
C	$3,37 \cdot 10^6 \text{ S/m}$	Conductivité
Substrat : PET		
Paramètre	Valeur	Définition
ϵ_r	2,25	Permittivité relative
H	50 μm	Epaisseur

Tableau.2. 7. Paramètres de la feuille Alu/PET

2.5.2. Inconvénients de l'impression sur Alu/PET

Le premier substrat souple métallisé choisi est l'Alu/PET en raison de son faible coût, sa bonne souplesse et la très bonne maîtrise de son procédé d'ablation laser.

Mais, ce type de substrat métallisé présente un problème au niveau de la connectique. La soudure avec l'étain n'est pas possible sur l'Aluminium. Par la suite, une autre alternative pour la mise en place des connecteurs SMA est proposée. C'est l'utilisation des films ACF (en anglais « Anisotropic Conductive Film»). Ce sont des films qui, théoriquement, assurent un bon contact électrique et mécanique. Mais, pour qu'ils soient fonctionnels, ils nécessitent, au moment de l'usinage, à la fois, une température entre 170° et 190° et une pression entre 1 et 4 MPa pour une durée qui peut atteindre une dizaine de secondes.

La feuille utilisée Alu/PET présente une couche très fine d'Aluminium (50µm) (tab.2.7) qui est facilement endommagée par ce procédé. Plusieurs lignes réalisées sont abimées avec l'utilisation de l'ACF pour la mise en place des connecteurs. En outre, le contact mécanique n'est pas robuste et quelques connecteurs se sont enlevés après leur mise en place.

C'est essentiellement pour cette raison que nous avons décidé d'opter plutôt pour une deuxième solution basée sur le kapton.

2.5.3. Kapton

Le film kapton désigne un film de polyimide (polymère coloré) qui a été développé par l'entreprise américaine DuPont.

Il a des propriétés physiques, chimiques, électriques et mécaniques exceptionnelles. Il se caractérise par sa souplesse et surtout par sa grande stabilité face à des températures extrêmes, très hautes (400°) ou très basses (-269°).

Le kapton est utilisé dans une grande variété d'applications souples. Il fait partie des polyimides utilisés pour la réalisation des capteurs souples, comme les capteurs de pression [2.8, 2.9]. Il est considéré comme étant un bon exemple de substrat souple, non couteux, durable et facile à usiner.

Pour réaliser la ligne de transmission souple, une feuille de cuivre/ Kapton est disponible. Toutes ses propriétés électriques sont présentées dans le tableau (tab2.8).

Conducteur : Cuivre (Cu)		
Paramètre	Valeur	Définition
T	18 μm	Epaisseur
C	$59,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$	Conductivité
Substrat : Kapton		
Paramètre	Valeur	Définition
ϵ_r	3,6	Permittivité relative
H	50 μm	Epaisseur

Tableau.2. 8. Paramètres d'une feuille Cu/Kapton

2.6. Procédés de réalisation

2.6.1. Lignes rigides

Des prototypes de lignes rigides (Cuivre/FR4) sont réalisés.

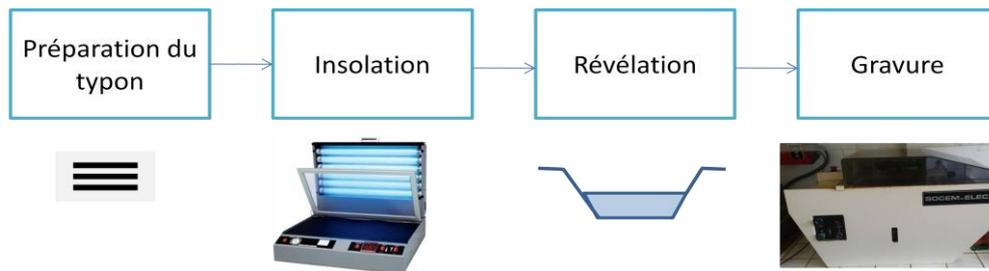


Figure.2. 29. Gravure chimique, « Process flow »

Pour ce type de lignes, c'est la gravure chimique qui est choisie comme procédé de réalisation.

Une méthode d'impression qui consiste à suivre en ordre les étapes de la figure 2.26 détaillées ci-après:

- Préparation du typon : Une feuille transparente sur laquelle le dessin du circuit imprimé (la ligne dans ce cas) est dessiné en noir. Elle peut être simplement un papier calque de qualité mais l'important c'est d'avoir un très bon contraste entre le circuit dessiné et la partie où rien n'est dessiné.

- Insolation : Une insoleuse est un appareil simple constitué de très peu de composants. Elle possède un ou plusieurs tubes UV permettant d'insoler des plaques de circuit imprimé sensibilisées (sensibles aux UV). L'insoleuse est aussi dotée de minuterie. Le temps d'insolation dépend de la puissance de rayonnement UV et de l'opacité du typon. Dans notre cas, nous choisissons 2min30, un temps d'insolation qui a été déterminé comme étant le temps idéal pour nos plaques CU/FR4 à partir de plusieurs tests précédents.

- Révélation/ Développement : Une fois que le circuit imprimé est pré sensibilisé et exposé aux UV, le produit nécessaire pour cette étape est un produit chimique très corrosif et dangereux. Il est soit sous forme liquide ou de poudre à diluer dans l'eau. Il est mis dans une bassine pour plonger le circuit dedans. Le temps de révélation est très rapide dans le cas où l'insolation est bien faite.

- Gravure : Cette étape consiste à dissoudre une partie de la plaque de cuivre du circuit imprimé. En fin de gravure, il ne doit rester que le cuivre correspondant au dessin du circuit imprimé. C'est le cuivre qui a été protégé contre les rayons UV de l'insolation par le dessin noir. La machine à graver que nous utilisons est un récipient contenant le produit chimique attaquant le cuivre (persulfate d'ammonium ou perchlorure de fer).

2.6.2. Lignes souples

La machine LPKF (fig.2.32) est utilisée pour la réalisation des lignes souples par ablation laser du métal sur les substrats souples métallisés.



Figure.2. 30. Photo de la machine LPKF protolaser S

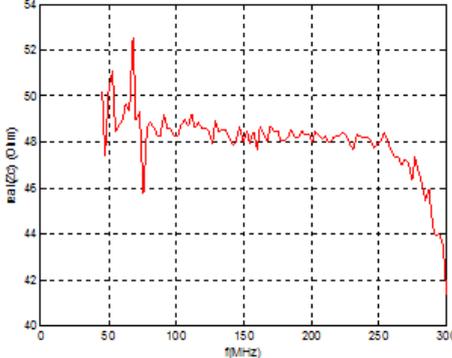
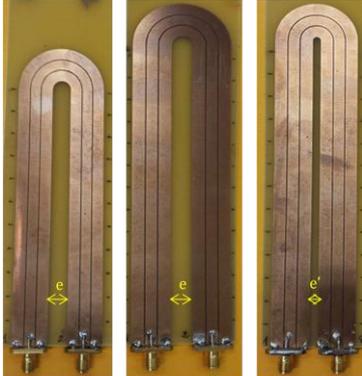
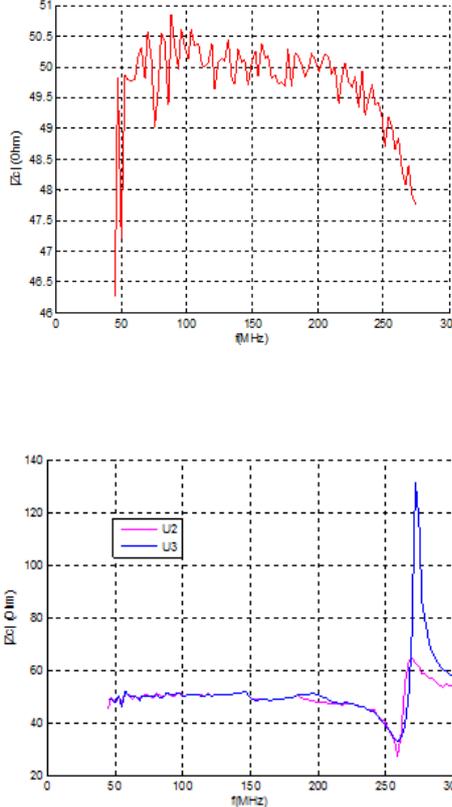
Pour la réalisation d'un circuit imprimé, deux logiciels sont fournis avec la machine LPKF :

- LPKF circuit Cam: Il permet de préparer les données pour la machine et convertir le fichier Gerber en un fichier d'extension .LMD, une extension lisible par le prochain logiciel à utiliser « LPKF circuit maker ».
- LPKF circuit Master: C'est le logiciel communiquant avec la machine de gravure. Les étapes à suivre sont les suivantes :
 - Déterminer les limites de la feuille PET/Alu.
 - Importer le fichier (.LMD) contenant le dessin de la ligne.
 - Choisir la recette, qui correspond à la caractérisation du faisceau laser en fonction du substrat choisi, sa nature et son épaisseur.
 - Sélectionner l'objet à graver.
 - Lancer la gravure.

2.7. Réalisations et résultats expérimentaux

2.7.1. Lignes rigides

Les dimensions transversales de ces lignes sont choisies suite aux simulations (tab.2.9).

Ligne	Courbe de Z_c en fonction de f	Interprétation
<p>Ligne droite ($L = 25$ cm)</p>  <p>Objectif de la réalisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vérification de l'adaptation avec les dimensions transversales choisies suite aux simulations. 		<p>La valeur obtenue fluctue autour de 48Ω, et reste quasiment constante jusqu'à la fréquence 250 MHz. Cette ligne satisfait alors au critère d'adaptation.</p> <p>→ Ses dimensions sont retenues pour la conception du serpentin.</p>
<p>Lignes en U</p>  <p>(a) U_1 (b) U_2 (c) U_3</p> <p>$L_1 = 25$cm, $L_2 = L_3 = 32$cm</p> <p>Objectifs des réalisations :</p> <p>Etudier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'effet de la forme du coude, - L'effet de la longueur de la ligne, - L'effet de l'espacement entre les deux branches. 		<p>U_1</p> <p>Z_c varie légèrement autour de 50Ω jusqu'à la fréquence 250MHz.</p> <p>→ Le coude n'influence pas l'adaptation de la ligne. (pour cette longueur de 25cm)</p> <p>U_2</p> <p>Pour $f < 250$ MHz, Z_c a une valeur qui fluctue autour de 50Ω. Mais, un pic perturbe l'adaptation à $f = 270$ MHz. Ce pic est une conséquence du couplage entre les deux branches qui n'apparaît qu'à partir d'une certaine longueur de ligne.</p> <p>U_3</p> <p>Le pic est présent dans la courbe de Z_c pour la même valeur de f (270 MHz). Mais,</p>

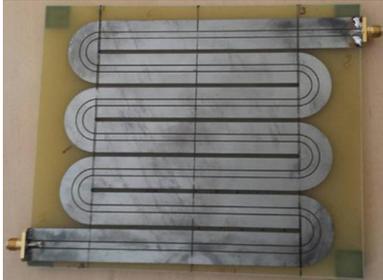
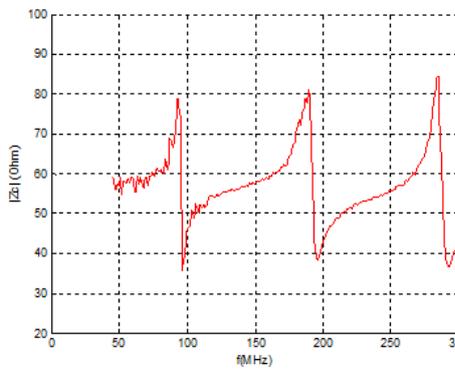
		il est accentué. C'est le résultat du rapprochement des deux branches ($\epsilon' < \epsilon$).
<p>Serpentin rigide (L=93,5 cm)</p>  <p>Objectif de la réalisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Avoir une ligne longue pour les tests de toucher et pour la validation de la méthode de localisation. 		<p>La valeur moyenne de Z_c est 55Ω. Mais, les pics dus à la juxtaposition des branches se reproduisent pour une longueur plus importante de ligne.</p> <p>L'effet de cette désadaptation sur les résultats de localisation est mis en évidence dans la partie expérimentale (Chapitre 4).</p>

Tableau.2. 9. Tableau de résultats pour les lignes rigides réalisées

2.7.2. Lignes souples

Deux types de substrat sont utilisés pour la réalisation de lignes souples : Alu/PET et Cu/Kapton.

Les dimensions d'une ligne de $Z_c = 50\Omega$ sont déterminées par simulations pour chaque type de substrat (tab.2.10 et tab.2.11).

Paramètre	Valeur
W	5.36 mm
G	100 μm
W_g	3.5 mm

Tableau.2. 10. Dimensions d'une ligne 50 Ω Alu/PET

Paramètre	Valeur
W	2.56 mm
G	115 μm
W_g	1 cm

Tableau.2. 11. Dimensions d'une ligne 50 Ω Cu/Kapton

Les réalisations sur substrats souples ainsi que les résultats de caractérisation sont tous présentés dans le tableau suivant.

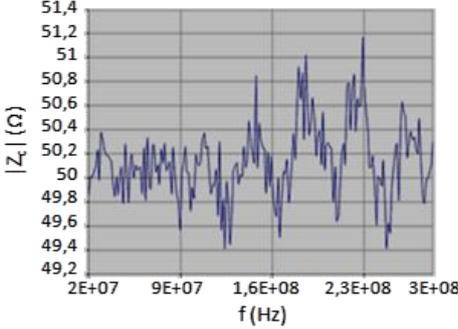
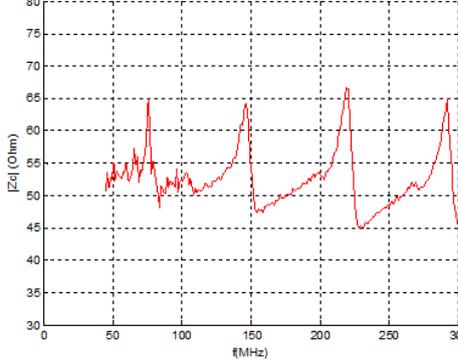
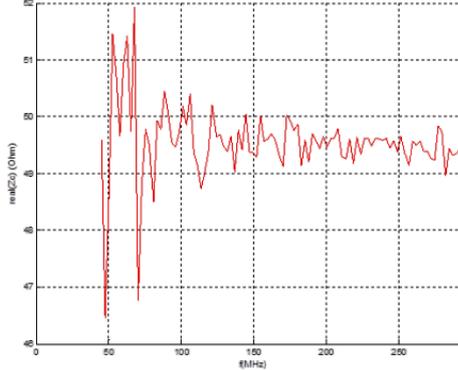
Ligne	Courbe de Z_c en fonction de f	Interprétation
<p>Ligne droite (Alu/PET, L=5cm)</p>  <p>Objectif de la réalisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vérification de l'adaptation avec les dimensions transversales choisies suite aux simulations. 		<p>La valeur de Z_c fluctue autour de 50Ω avec une variation de $0,8\Omega$.</p> <p>L'adaptation de la ligne est bonne.</p> <p>→ Dimensions à retenir pour la réalisation de la ligne en serpentín.</p>
<p>Ligne en serpentín (Alu/PET, L=171 cm)</p>  <p>- Avoir une ligne longue pour les tests de toucher et pour la validation de la méthode de localisation.</p>		<p>Valeurs de Z_c proches de 50Ω avec des pics qui apparaissent à cause de la juxtaposition de lignes.</p> <p>L'effet de la désadaptation de la ligne sur l'erreur de localisation est mis en évidence dans la partie expérimentale (chapitre 4).</p>
<p>Ligne droite (Cu/Kapton, L=20cm)</p> 		<p>Une valeur qui fluctue autour de $49,5\Omega$ confirme la bonne adaptation de la ligne.</p> <p>→ En perspectives, une ligne en serpentín qui assure le maximum d'adaptation sera réalisée en se basant sur les dimensions de cette ligne.</p>

Tableau.2. 12. Tableau de résultats pour les lignes souples réalisées

2.8. Synthèse

La base de la surface tactile est une ligne de transmission imprimée sur substrat souple. C'est une proposition qui satisfait les spécificités du système qui sont la souplesse, le port unique de connexion et la grande taille.

Dans ce chapitre, la première partie était dédiée à une introduction détaillée sur les lignes de transmission avec le modèle électrique ainsi que leurs paramètres caractéristiques.

A partir de ce modèle électrique, l'impact du toucher sur la ligne a été mis en œuvre. La perturbation des lignes de champ est détectée par une désadaptation locale de la ligne.

Ensuite, différents types de lignes de transmission ont été présentés. En fonction des critères de conception choisis, une comparaison a été menée entre eux. Faute de sensibilité, le câble coaxial a été éliminé dès le début pour laisser la place aux circuits planaires. La ligne coplanaire (CPW) et le guide à fente (slotline) étaient les mieux classés du point de vue sensibilité. Mais, la deuxième, présentant des énormes pertes à cause de la grande largeur de son conducteur, n'a pas été choisie. La comparaison s'est alors restreinte à deux types de lignes qui ne présentent pas le même type de sensibilité : La CPW et le guide à ruban (stripline). La stripline, avec un substrat élastique, peut assurer une sensibilité mécanique à la pression du doigt. Mais la sensibilité d'une ligne coplanaire reste meilleure. En outre, pour des raisons de simplicité c'est la CPW qui a été choisie pour être réalisée.

Après, c'était la partie conception de ligne qui était présentée. L'objectif était, d'une part, de déterminer les meilleures dimensions permettant d'assurer une adaptation à 50Ω . Et, d'autre part, de bien modéliser la forme en serpent de la dalle tactile.

Enfin, les différentes réalisations ont été exposées pour trois types de substrat. D'abord, le substrat rigide (Cu/FR4) qui était un point de départ, ensuite, les deux substrats souples (Alu/PET) et (Cu/kapton). Les procédés de réalisation ont été présentés pour chaque type de substrat. Et, les lignes réalisées ont été caractérisées avec des mesures de VNA pour tracer leurs courbes d'impédance caractéristique.

Dans ce chapitre, le comportement tactile d'une ligne de transmission est expliqué. Le principe de détection de toucher est basée sur la désadaptation locale créée par le contact d'un conducteur avec la ligne. Le chapitre suivant part de la notion de réflectométrie qu'engendre cette désadaptation pour élaborer le principe de localisation. Un algorithme ainsi qu'un circuit de localisation sont proposés.