

# Étude d'un oscillateur de grande pureté spectrale, stabilisé par une ligne à retard en métamatériau à supra-conducteur.

Dans le domaine des radars, il est nécessaire de disposer d'oscillateurs de très grande pureté spectrale. Avec un oscillateur idéal purement mono-fréquentiel, il est aisé de séparer les signaux utiles qui résultent de la réflexion sur des cibles mobiles, des échos parasites dus aux réflexions sur des cibles fixes grâce à l'effet Doppler. En pratique, la largeur spectrale des signaux radar est principalement due aux instabilités de l'oscillateur source. L'amélioration de la pureté spectrale des oscillateurs est donc un axe intéressant d'étude pour permettre d'améliorer la limite de détection des systèmes radar.

Les oscillateurs microondes sont des systèmes bouclés qui génèrent des signaux périodiques quasi sinusoïdaux. Ils sont en général constitués d'un amplificateur rebouclé. L'oscillation pour un tel système linéaire ne peut se produire que pour des conditions précises de gain et de phase. Une des techniques employée pour maîtriser ces conditions, dans le domaine des oscillateurs micro-ondes pour les applications radar, consiste à utiliser une ligne à retard en fibre-optique pour maîtriser la condition de phase (Fig. 1). Il s'agit des oscillateurs optoélectroniques couplés (COEO). Ce type d'oscillateurs impose dans sa boucle de convertir un signal électrique en un signal optique, puis de le reconvertir de nouveau en un signal électrique.

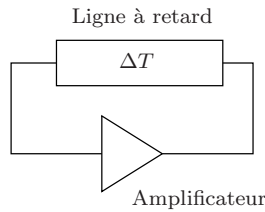


Figure 1: Principe d'un oscillateur à ligne à retard

La fonction de transfert en boucle ouverte de ce système linéaire est:

$$H(p) = G(p)e^{-p\Delta t} \tag{1}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte correspond à celle d'un système stable. Ainsi le système en boucle fermée reste stable tant que le diagramme de Nyquist (Figure 2) de la fonction en boucle ouverte reste à droite du point critique  $(-1, 0)$ . En faisant l'hypothèse que  $G(p) \in \mathbb{R}^+$ , des oscillations sinusoïdales se développent quand les conditions suivantes sont vérifiées :

$$\begin{cases} \omega\Delta T = \pi + 2k\pi \\ G(p) = -1 \end{cases} \tag{2}$$

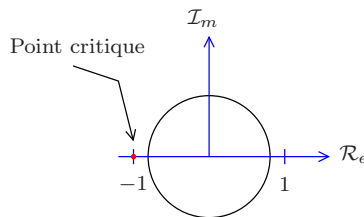


Figure 2: Diagramme de Nyquist de la fonction de transfert en boucle ouverte d'un oscillateur à ligne à retard idéale ( $|G(p)| = 0.8$ ).

Au final, on obtient une distribution en peigne de la figure 3 pour les fréquences auxquelles peuvent se produire les oscillations.

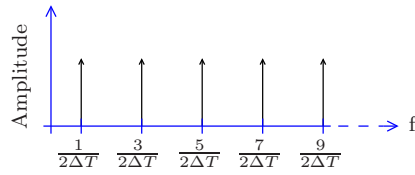


Figure 3: Fréquences possibles pour un oscillateur bouclé avec un retard  $\Delta T$

Depuis les années 2000, les métamatériaux font l'objet d'études intensives, variées et nombreuses. Ce sont, de façon générale, des matériaux structurés artificiels qui présentent des propriétés non rencontrées dans la nature : indice négatif, propagation gauche etc... En électronique hyperfréquence, lorsqu'ils sont monodimensionnels, ils constituent une nouvelle approche de la théorie des circuits et permettent l'ingénierie de bande.

Une ligne à retard en métamatériau 1D est composée de capacités et bobines discrètes dont les dimensions sont petites devant la longueur d'onde de l'onde électromagnétique que l'on souhaite propager à l'intérieur (exemple de réalisation Fig. 4).

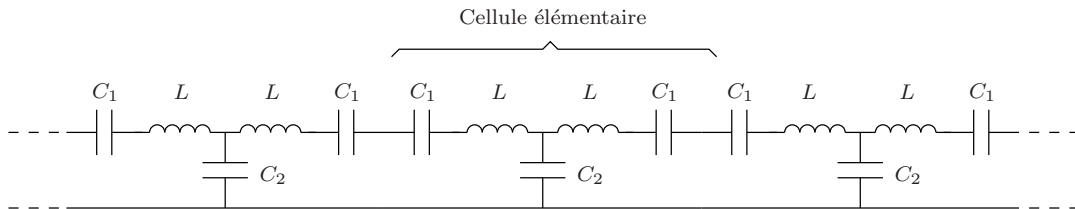


Figure 4: Exemple de structure pour une ligne à retard droite en métamatériau 1D

L'ingénierie des bandes de propagation permet de contrôler la propagation en fonction de la fréquence.

Sans perte, le type de structure de métamatériau de la figure 4 présente une bande de fréquence où les ondes peuvent se propager, entourées de deux bandes interdites dans lesquelles les ondes sont évanescentes (Fig. 5). Considérons cette bande de fréquence de propagation avec une largeur spectrale de  $1/\Delta T$  et centrée autour de  $f_0$ . Il a été démontré que si  $\Delta f \ll f_0$ , le délai de groupe et la vitesse de groupe au centre de la bande de propagation sont:

$$G_d = \frac{1}{\Delta f} \text{ s/Cellule} \quad (3)$$

$$v_g = \Delta f \text{ Cellule/s} \quad (4)$$

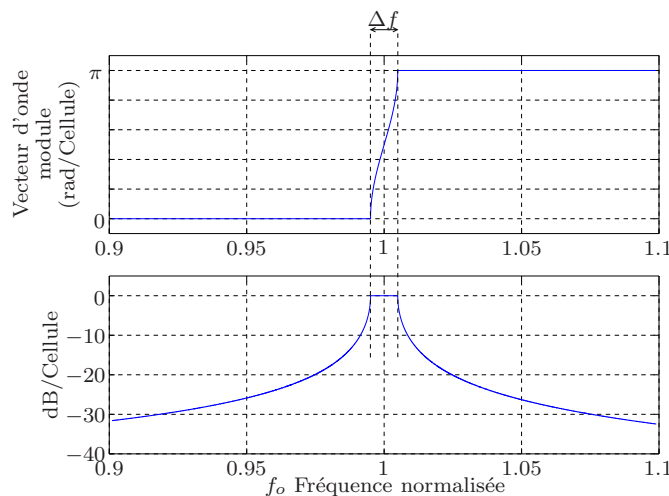


Figure 5: Bande de fréquences passante entourée de deux bandes où les ondes sont évanescentes pour une ligne en métamatériau

Il est alors possible de réaliser des lignes à retard très compactes. Pour obtenir un grand retard, il faut synthétiser une bande passante très étroite. On obtient alors un dispositif très adapté à la stabilisation d'un oscillateur : les fréquences d'oscillation possibles sont pilotées par l'aspect ligne à retard du dispositif et la fréquence effectivement synthétisée est sélectionnée par l'aspect filtre de la ligne.

$f_0$  pouvant être fixée indépendamment de  $\Delta f$ , en utilisant une ligne à retard en métamatériau 1D de  $N$  cellules, il est possible de sélectionner précisément la fréquence d'oscillation de l'oscillateur utilisant cette ligne à retard comme rebouclage. On obtient :

$$f_{\text{osc}} = f_0 = \frac{2k+1}{2N} \Delta f$$

avec :  $\frac{2k+1}{2N} \gg 1$

Le figure 6 présente la sélection de la fréquence de résonance à la fois par l'atténuation de la ligne en métamatériau et par la discrimination des fréquences possibles liée au caractère bouclé de la structure. Ainsi, plus la ligne est longue, plus l'atténuation est importante pour une largeur de bande fixée, ce qui est bénéfique. Malheureusement le délai long correspondant implique un pas fréquentiel petit dans le peigne des fréquences du système bouclé. Tant que la ligne est plus longue qu'un élément ce qui est typiquement le cas, plusieurs fréquences sont en théorie possibles. Dans la figure 6, les valeurs 1 et 3 ont été choisies pour  $N$  parce qu'elles permettent une bonne représentation du phénomène.

Pour sélectionner une fréquence unique, il est envisageable d'utiliser, sur une architecture d'oscillateur à double boucle, une seconde ligne à retard en tant que filtre cette fois. En effet, il est possible d'obtenir une fonction de filtrage aussi sélective que nécessaire avec une telle ligne.

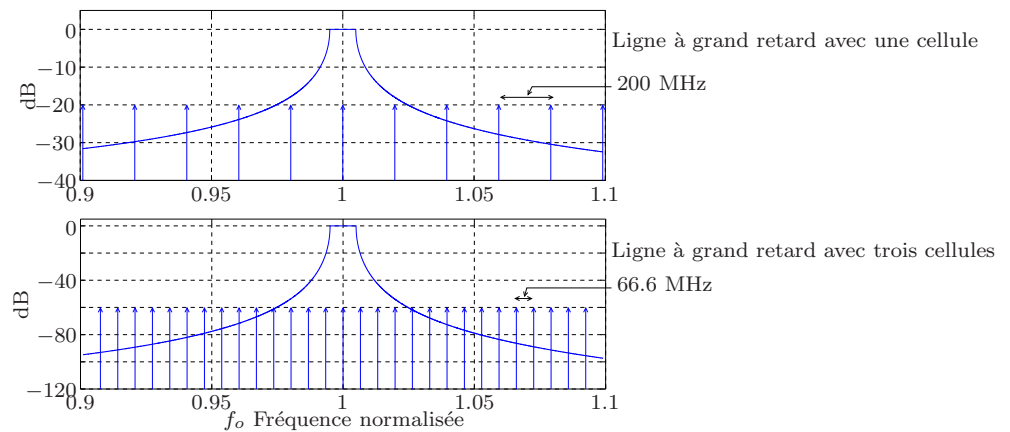


Figure 6: La sélection de la fréquence par le métamatériau combinée à la discrimination liée à la ligne à retard pour  $N=1$  et  $N=3$

Ces résultats, montrant qu'une ligne à retard en métamatériau permet une très bonne sélectivité en fréquence, ne sont possibles que si la ligne en métamatériau présente des pertes très faibles. Malheureusement, nous avons aussi démontré que les pertes dans les structures de ligne (Fig. 4) sont essentiellement dues à la résistance électrique des conducteurs. Ainsi nous avons calculés que les pertes dépendaient de la quantité  $L_f$  (Facteur de perte eq. 5)

$$L_f = \frac{a}{4\pi\Delta f} \quad (5)$$

Dans l'équation 5,  $a$  est la résistance par Henry de l'inductance utilisée et  $\Delta f$  la largeur spectrale de la bande passante de la ligne. Ceci montre que les pertes sont d'autant plus élevées que la bande passante est étroite.

L'atténuation dans ce type de dispositif est ainsi directement liée à l'inverse de sa bande passante, multiplié par la résistance des inductances qui le constituent. Ces pertes peuvent bien sûr être compensées par l'amplificateur de la boucle. Ce n'est cependant pas optimal en terme de bruit et donc de pureté spectrale.

Une autre approche qui semble plus intéressante consiste à utiliser un matériau supra-conducteur à haute température critique ( $-193^\circ\text{C}$  dans l'azote liquide) comme certains cuprates tel que l'YBaCuO pour réaliser la ligne à retard à base de métamatériaux. Cependant, ces matériaux présentent de nombreuses contraintes dans leur utilisation, notamment une géométrie plane car ils ne permettent pas la réalisation de fils du fait de leur état cristallin.

Nous avons déjà vérifié la faisabilité de ligne à retard en métamatériau en technologie MMIC (circuit intégré monolithique hyperfréquence). Le saut technologique consiste ici à passer à l'YBaCuO. Ce passage pose de nombreuses questions de caractérisation et de dimensionnement. Il sera sans doute nécessaire dans un premier temps d'envisager une solution hybride.

Le doctorant aura la charge de la réalisation complète d'un prototype fonctionnel de ligne métamatériau 1D en technologie supraconductrice. Ceci implique une première étape de définition et de simulation avec la bibliographie associée, puis une étape importante de synthèse et de tests en enceinte cryogénique.