

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique et génie informatique

RAPPORT DE L'UNITÉ 6

Propagation guidée d'ondes électromagnétiques
APP6

Présenté à
Mohamed Najah

Présenté par
Équipe numéro 7
Abdoul Rahim Boinzem Ouedraogo – OUEJ5130
Anthony Royer – ROYA2019

Sherbrooke - 1er août 2023

TABLE DES MATIÈRES

1.	Introduction	1
2.	Une seule ligne	1
2.1	Représentation théorique des signaux V1 et V2	1
2.2	Simulation avec variations du temps de montée et descente du signal numérique	3
2.3	Simulations avec variations du temps de propagation	3
3.	Deux lignes	5
3.1	Dimensions de la ligne	5
3.2	Adaptation en entrée ou en sortie	6
3.3	Amélioration des autres tensions	7
4.	Circuit final	9
4.1	méthode permettant d'améliorer significativement le problème restant	9
4.2	Démonstration par simulation	11
5.	Conclusion	13
6.	Références	14
Annexe A	Schéma de réflexion dans la ligne	15
Annexe B	Code Matlab du calcul de V1 et V2	16
Annexe C	Laboratoire	18

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation théorique de V1 et V2	2
Figure 2 : Simulation de V1 et V2	2
Figure 3 : Signaux avec t_{Rise} & $t_{Fall} = 0.4ns$	3
Figure 4 : Signaux avec t_{Rise} & $t_{Fall} = 0.5ns$	3
Figure 5 : Signaux avec $t_{Delais} = 0.8ns$	4
Figure 6 : Signaux avec $t_{Delais} = 1.2ns$	4
Figure 7 : Signaux avec $t_{Delais} = 2ns$	4
Figure 8 : Signaux avec $t_{Delais} = 5ns$	4
Figure 9 : Paramètres de la ligne pour 50Ω	5
Figure 10 : Signaux avant adaptation	6
Figure 11 : Signaux après adaptation	6
Figure 12 : Signaux adaptés avec $t_{Rise} = t_{Fall} = 0.1ns$	7
Figure 13 : Signaux adaptés avec $t_{Rise} = 0.01ns$	7
Figure 14 : Signaux adaptés avec $t_{Rise} = 0.2ns$	7
Figure 15 : Signaux adaptés avec $t_{Rise} = 0.5ns$	8
Figure 16 : Circuit Deux Lignes (Fin de section)	8
Figure 17 : Signaux sans améliorations importantes	9
Figure 18 : Signaux avec longueur doublée ($L=100mm$)	9
Figure 19 : Signaux avec moitié longueur ($L=25mm$)	10
Figure 20 : Signaux avec longueur minimale ($L=10mm$)	10
Figure 21 : Signaux avec VIAs et ligne de mise à la terre ajoutés entre les lignes.	10
Figure 22 : Circuit Final	11
Figure 23 : Tensions du circuit Final	11
Figure 24 : Quantification du bruit final	12
Figure 25 : PCBs proposés initialement (a) brisé (b) partiellement fonctionnel	13
Figure 26 : Schéma de réflexion et calculs	15
Figure 27 : Code Principal calcul V1 V2	16
Figure 28 : Calcul Tensions reflétées (pour V1 et V2)	16
Figure 29 : Calcul des valeurs de tension V1 et V2 pour cas individuels	17

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs de v_1 et V_2	1
Tableau 2 : Longueur de ligne selon le délai	4

1. INTRODUCTION

L'objectif de cette problématique est d'améliorer le fonctionnement d'un circuit.

2. UNE SEULE LIGNE

2.1 REPRÉSENTATION THÉORIQUE DES SIGNAUX V1 ET V2

La première étape est de déterminer les coefficients de réflexion et de transmission.

$$\Gamma_S = \frac{R1 - Z_C}{R1 + Z_C} = \frac{20 \Omega - 50 \Omega}{20 \Omega + 50 \Omega} = \frac{-3}{7} = \sim -0,429$$

$$\Gamma_L = \frac{R2 - Z_C}{R2 + Z_C} = \frac{1M\Omega - 50\Omega}{1M\Omega + 50\Omega} = 0,999900005$$

$$\tau_l = 1 + \Gamma_L = 1,999900005$$

La deuxième étape est de trouver les tensions V+ et V-.

$$V^+ = \frac{Z_C}{Z_C + R1} * V_g = \frac{50 \Omega}{50\Omega + 20\Omega} * 5V = \frac{25}{7} = \sim 3.57 V$$

$$V^- = -V^+ = \frac{-25}{7} = \sim -3.57 V$$

La troisième étape est de mettre en pratique les valeurs calculées et déterminer les valeurs de V1 et V2 (en considérant le diagramme de réflexion [Annexe A]). Matlab fût utilisé afin d'automatiser le calcul [en page 16]. Voici une brève explication de la logique utilisée : le code calcul pour une impulsion positive et une négative sur une période complète, combine les parties pour former un signal d'une impulsion complète et se sert de ces impulsions individuelles afin de recréer le signal complet. Les valeurs finales des tensions V1 et V2 sont affichées ci-dessous.

Tableau 1 : Valeurs de v1 et V2

Time (ns)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
V1	3,57	3,57	5,10	5,10	4,45	0,87	1,16	-0,37	-0,50	0,16	3,78	3,50	5,01	5,13	4,49	0,86	1,14	-0,37	-0,49	0,16	0,21
V2	0,00	7,14	7,14	4,08	4,08	5,39	-1,75	-2,31	0,75	0,99	-0,32	6,72	7,28	4,26	4,02	5,31	-1,72	-2,28	0,74	0,98	-0,32

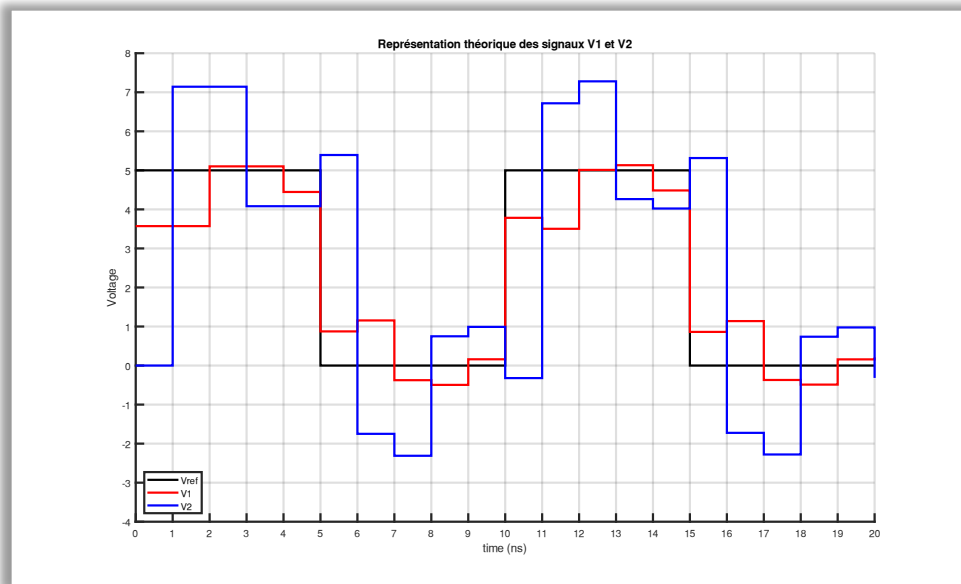


Figure 1 : Représentation théorique de V1 et V2

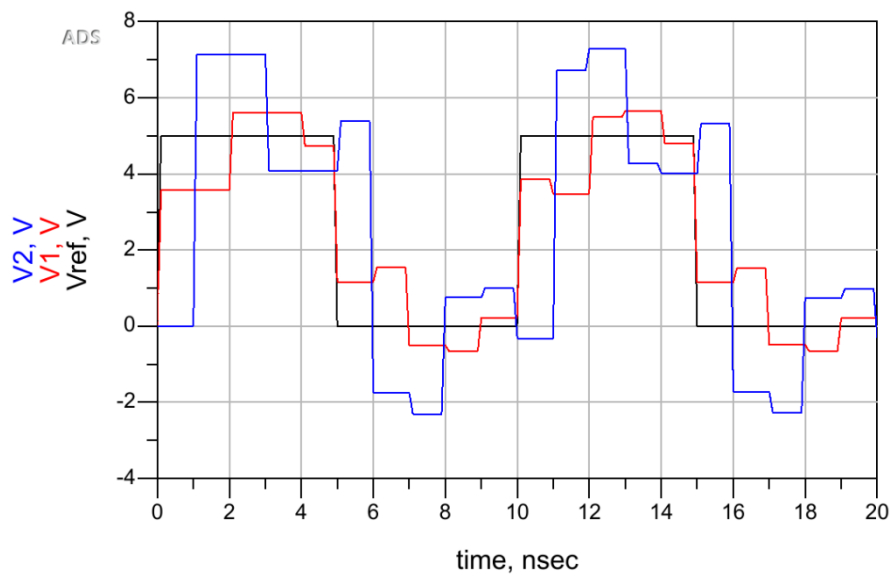


Figure 2 : Simulation de V1 et V2

2.2 SIMULATION AVEC VARIATIONS DU TEMPS DE MONTÉE ET DESCENTE DU SIGNAL NUMÉRIQUE

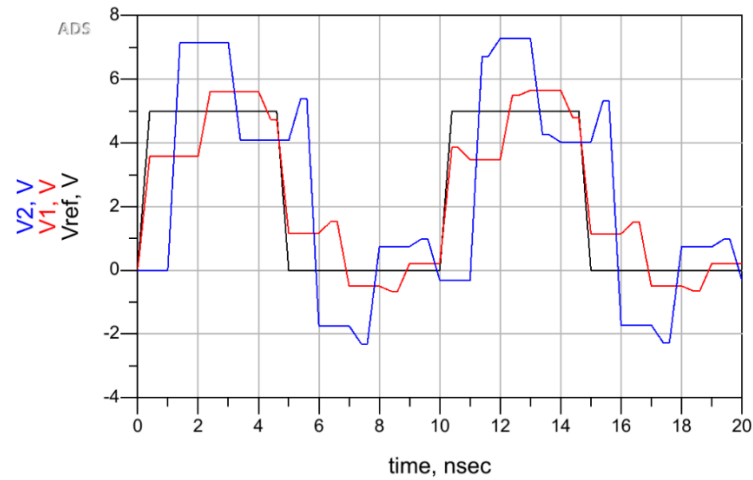


Figure 3 : Signaux avec t_{Rise} & $t_{Fall} = 0.4ns$

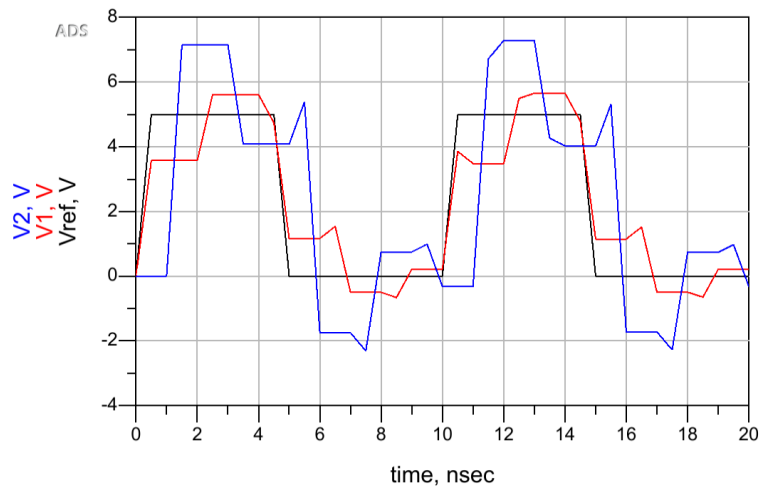


Figure 4 : Signaux avec t_{Rise} & $t_{Fall} = 0.5ns$

Le temps de montée et de descente sont des temps de transitions. Le délai de propagation de l'onde est de 1 ns. Cela signifie qu'il faut 1 ns pour que l'onde atteigne l'extrémité de la ligne. Le temps de montée et de descente sont inclus dans les 1 ns de propagation. Quand le temps de montée additionné au temps de descente tend vers la valeur du temps de propagation de l'onde, il y a une distorsion sur le résultat de simulation en ce sens qu'il est difficile de distinguer tous les états (Valeurs de la tension) à l'extrémité de la ligne pour chaque période de propagation (1ns). Conclusion : $t_{Rise} + t_{Fall}$ ne doit pas être supérieur à 80% de t_{Delay} .

2.3 SIMULATIONS AVEC VARIATIONS DU TEMPS DE PROPAGATION

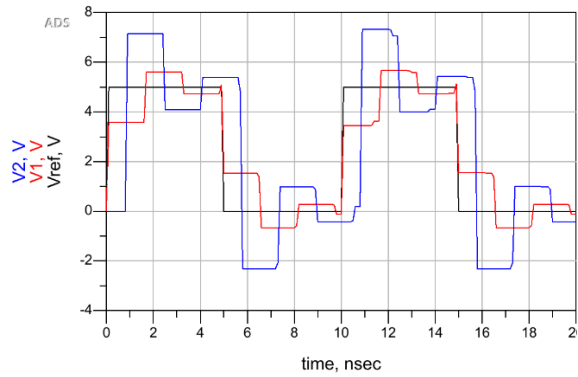


Figure 5 : Signaux avec tDelais = 0.8ns

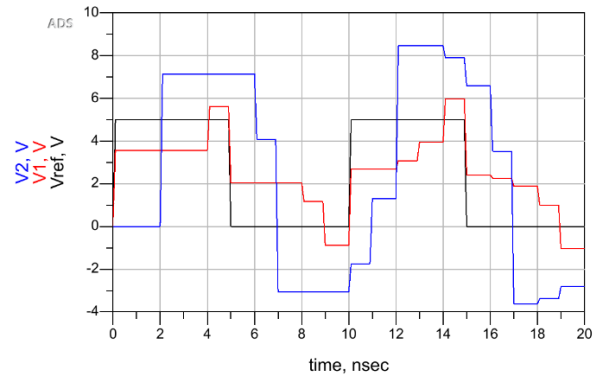


Figure 7 : Signaux avec tDelais = 2ns

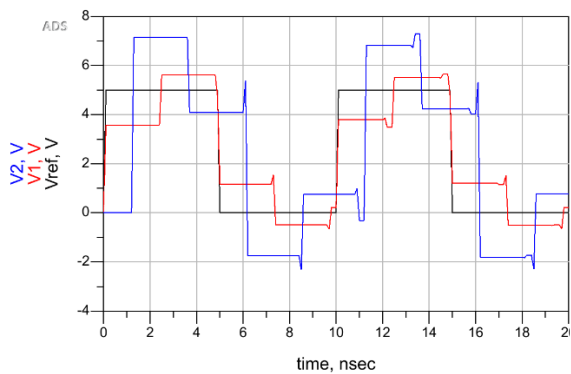


Figure 6 : Signaux avec tDelais = 1.2ns

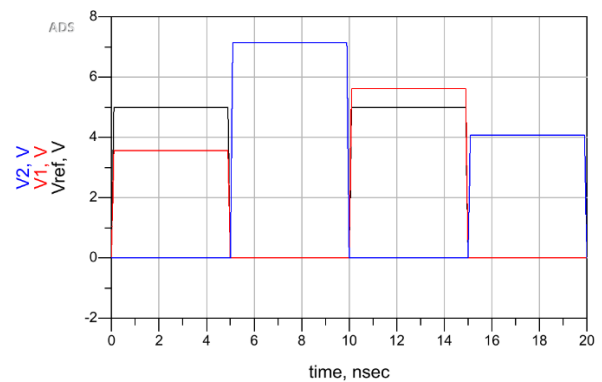


Figure 8 : Signaux avec tDelais = 5ns

Tableau 2 : Longueur de ligne selon le délai

tDelais	Longueur de la ligne	Vitesse d'onde
1 ns	50 mm	$5 \cdot 10^7$ m/s
0.8 ns	40 mm	$5 \cdot 10^7$ m/s
1.2 ns	60 mm	$5 \cdot 10^7$ m/s
2 ns	100 mm	$5 \cdot 10^7$ m/s
5 ns	250 mm	$5 \cdot 10^7$ m/s

L'augmentation du délai de propagation ramène à augmenter la longueur de la ligne. Cela ramène à augmenter la période des différents états (valeurs de tension) que peut prendre l'extrémité de la ligne. Ainsi plus le délai de propagation augmente, plus le temps mis par la ligne pour réagir à une excitation est grande. Par exemple dans la figure avec tDelay = 5 ns, le début de la ligne ne prend la valeur du front montant que lorsque le signal de la source entre en front descendant. C'est-à-dire que lors de la mesure des signaux il faut tenir compte de ce décalage.

3. DEUX LIGNES

3.1 DIMENSIONS DE LA LIGNE

Pour le calcul des paramètres de la ligne, il était possible d'effectuer des calculs théoriques. Toutefois, puisqu'un utilitaire était fourni dans le programme ADS, celui-ci fut favorisé par son approche itérative et son efficacité. Comme mentionné plus tôt, un processus itératif fut employé. Toutefois, avant de commencer à itérer, les valeurs de base furent insérées aux endroits applicables. Des valeurs de base de dimension de la ligne furent entrées, suivit d'une utilisation de la fonction d'analyse, suivit d'une modification de la résistance de la ligne pour être enfin suivit d'une utilisation du bouton de synthétisation. Ce processus permet des modifications de plus en plus graduelles et précises de nos valeurs. Les valeurs suivantes ont été obtenues après environ 5 itérations. Il est important de noter que l'espacement de 3mm et la longueur de 50mm ont été conservés. Une valeur de largeur de ligne finale de 2.90487mm fut obtenue.

The screenshot shows the LineCalc/untitled window with the following parameters:

Substrate Parameters	
ID	MSUB_DEFAULT
Er	4.600
Mur	1.000
H	1.600 mm
Hu	1e+33 mm
T	0.000 mm
Cond	5.8e7
TanD	0.013
Rough	0.000 mm
DielectricLossModel	1.000
FreqForEpsrTanD	1.0e9
LowFreqForTanD	1.0e3
HighFreqForTanD	1.0e12

Physical	
W	2.904870 mm
S	3.000 mm
L	50.000 mm

Electrical	
ZE	53.327400 Ohm
ZO	46.880200 Ohm
Z0	50.000000 Ohm
C_DB	-23.830600
E_Eff	11.213300 deg

Calculated Results:

- KE = 3.714
- KD = 3.268
- AE_DB = 0.010
- AO_DB = 0.009
- SkinDepth = 0.260

Component Parameters:

- Freq: 0.100 GHz

Values are consistent

Figure 9 : Paramètres de la ligne pour 50Ω

3.2 ADAPTATION EN ENTRÉE OU EN SORTIE

La [Figure 10] ci-dessous présente le résultat des simulations avant adaptation des impédances en entrée et de sortie. Comme il est démontré, la différence d'impédance crée une réflexion qui est à l'origine des oscillations sur les 2 images.

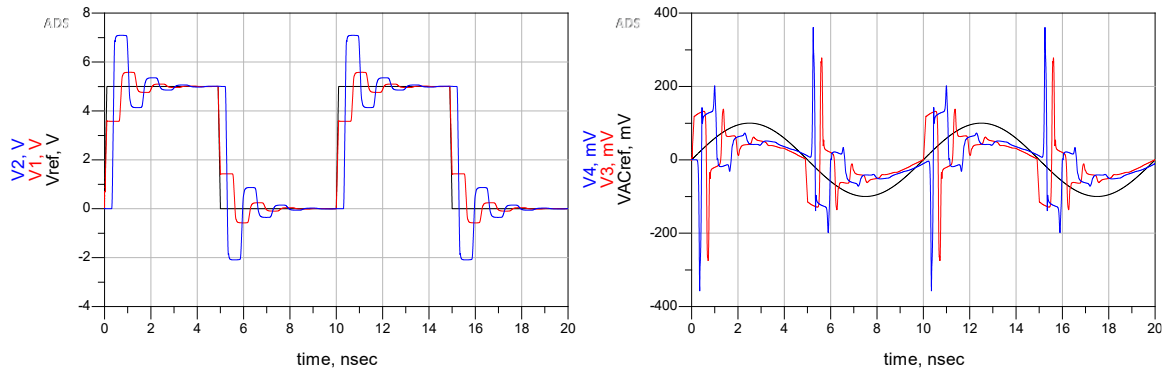


Figure 10 : Signaux avant adaptation

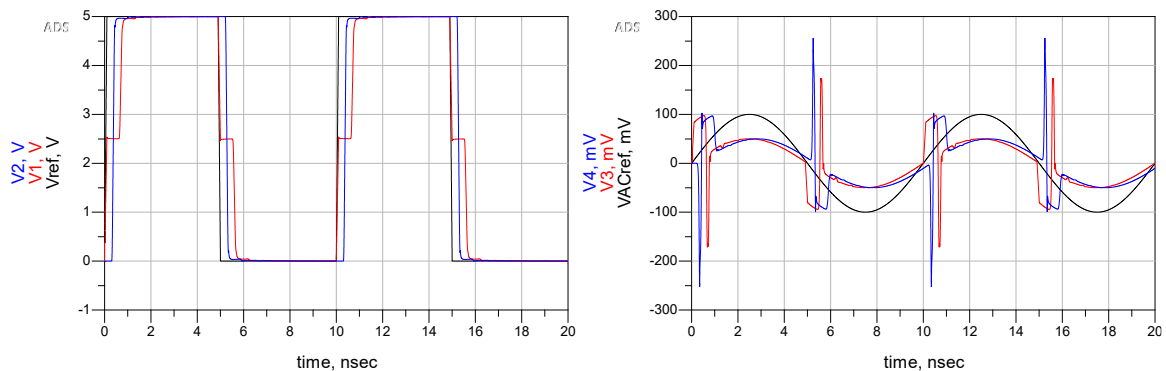


Figure 11 : Signaux après adaptation

La [Figure 11] ci-dessus présente le résultat des simulations après l'adaptation des impédances en entrée. On peut voir que le fait d'adapter l'entrée ($R1 + R_{\text{serie}} = 50 \text{ Ohms}$) de la ligne à source d'impulsion (onde carré) réduit les oscillations dû aux réflexions. Cependant, pour la ligne à source sinusoïdale l'adaptation de l'impédance de sortie est difficile en pratique car l'antenne a besoin de courant et qu'un ajout d'une résistance série pour réduire l'atténuation viendrait limiter le courant de l'antenne. De plus, l'antenne est déjà à 50 Ohms, tout comme la ligne et la source. Les pics restants sont dû à l'effet capacitif des lignes qui se comportent comme des circuits fermés et des circuits ouverts dépendamment de la valeur de référence.

3.3 AMÉLIORATION DES AUTRES TENSIONS

Afin de poursuivre le chemin vers le parfait signal, il est possible de procéder à une amélioration en modifiant le temps d'ascension et de descente. Les figures suivantes démontrent le signal initial, avec diminution du temps (changements plus rapides et onde plus « carrée ») ainsi qu'avec une augmentation du temps (changements plus lents). Pour commencer, il est possible d'observer avec [Figure 13] qu'une diminution du temps cause une augmentation significative des pics sur le signal sinusoïdal. Au contraire, il est possible d'observer une diminution de l'amplitude des impulsions avec une augmentation du temps de montée sur les autres figures. Après quelques itérations, un délai de 0.5ns fut sélectionné pour son efficacité et qu'il ne s'approche pas trop de 1ns et ne dépasse pas trop l'amplitude du signal.

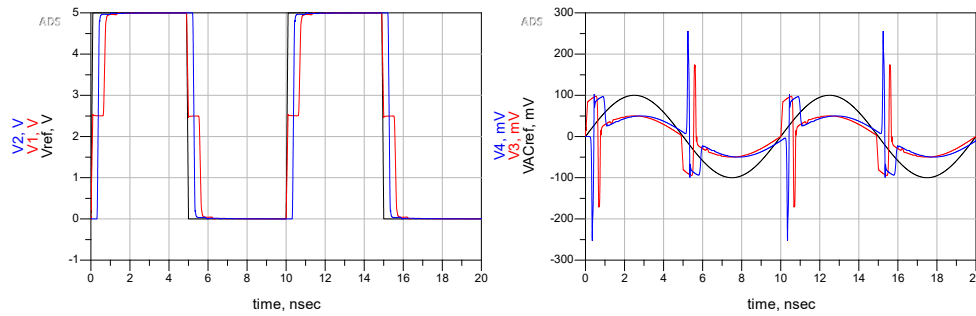


Figure 12 : Signaux adaptés avec $t_{Rise} = t_{Fall} = 0.1ns$

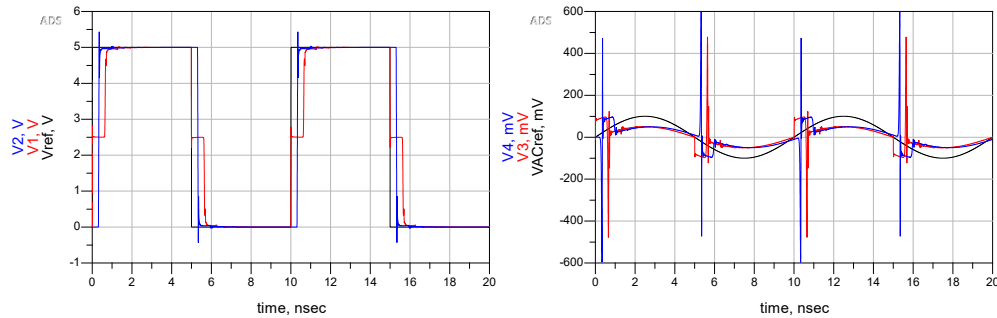


Figure 13 : Signaux adaptés avec $t_{Rise} = 0.01ns$

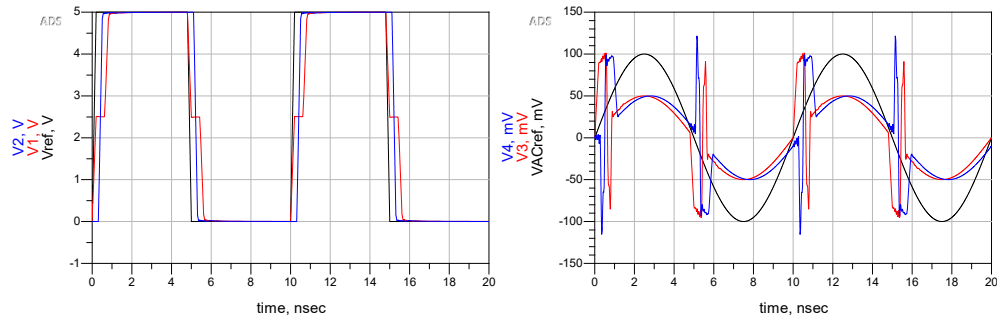


Figure 14 : Signaux adaptés avec $t_{Rise} = 0.2ns$

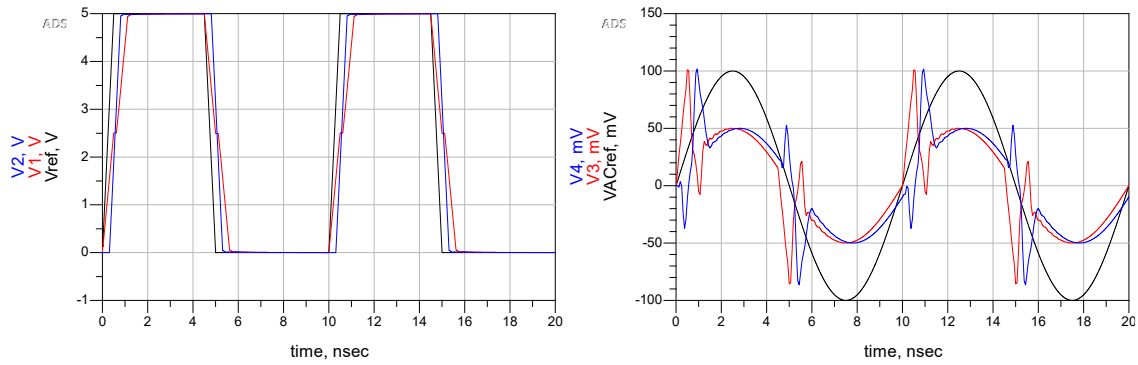


Figure 15 : Signaux adaptés avec $t_{\text{Rise}} = 0.5\text{ns}$

Voici le schéma en ce point.

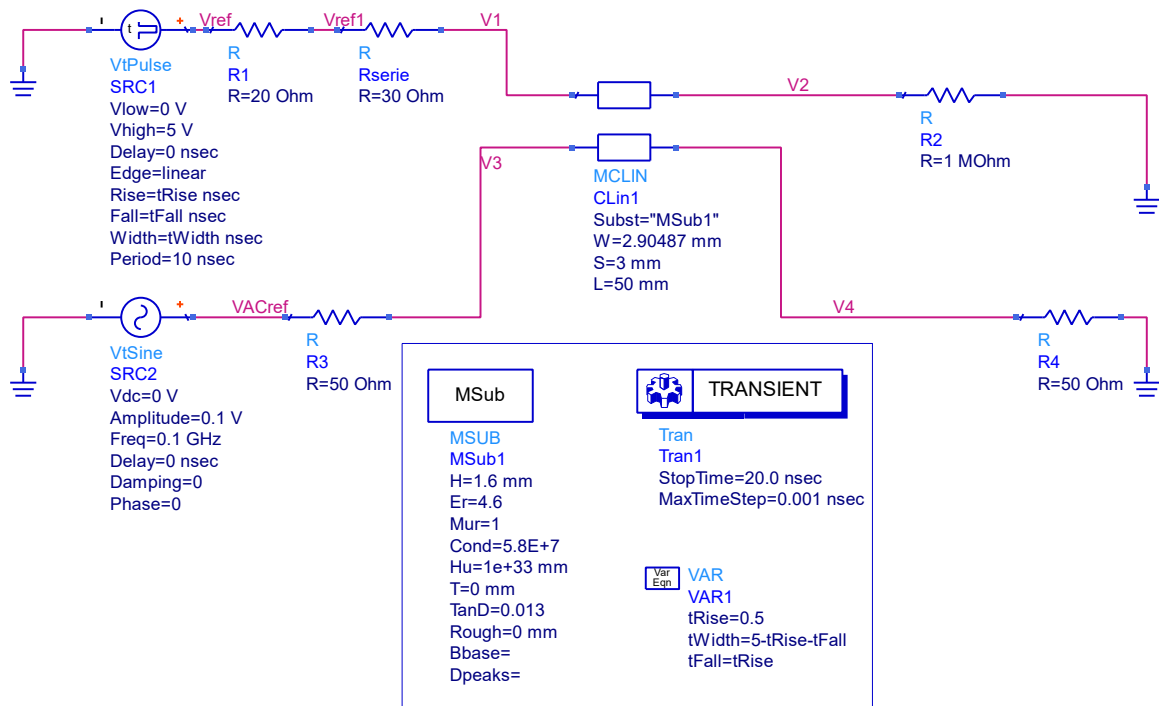


Figure 16 : Circuit Deux Lignes (Fin de section)

4. CIRCUIT FINAL

4.1 MÉTHODE PERMETTANT D'AMÉLIORER SIGNIFICATIVEMENT LE PROBLÈME RESTANT

Afin d'améliorer le signal de manière significative, il faut procéder par étapes. La première étape est d'ajuster la longueur de la ligne. Changer la longueur de la ligne vient directement affecter les délais. Les figures suivantes démontrent l'allure du signal avant modification, avec augmentation de la longueur à 100mm, diminution de moitié à 25mm et une diminution maximale à 10mm (selon les spécifications du client). Il est possible d'observer une augmentation importante de l'impact des pics sur le signal de sortie avec l'augmentation de la longueur de la ligne. Au contraire, il est possible d'observer une amélioration de la qualité du signal avec une diminution partielle de la longueur et une plus grande amélioration avec une longueur minimale de 10mm (principalement sur le signal V4, mais il y a aussi une amélioration du signal V2 quant à son allure ainsi que le délais).

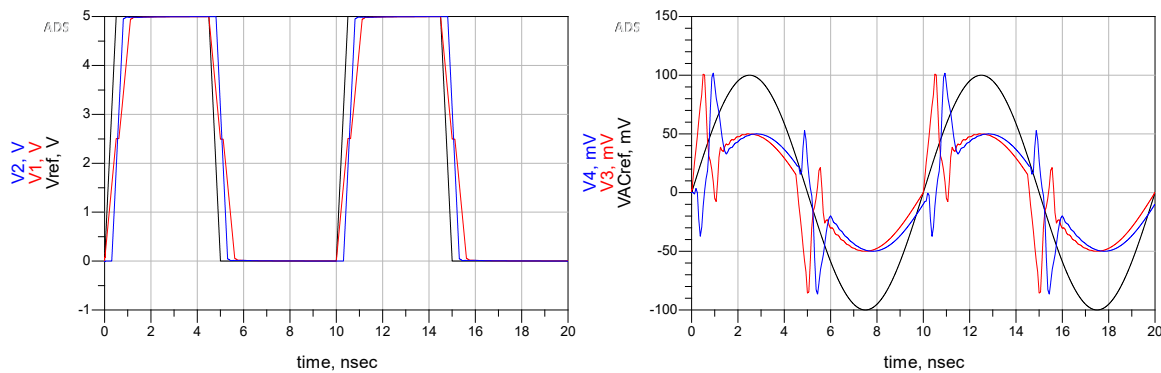


Figure 17 : Signaux sans améliorations importantes

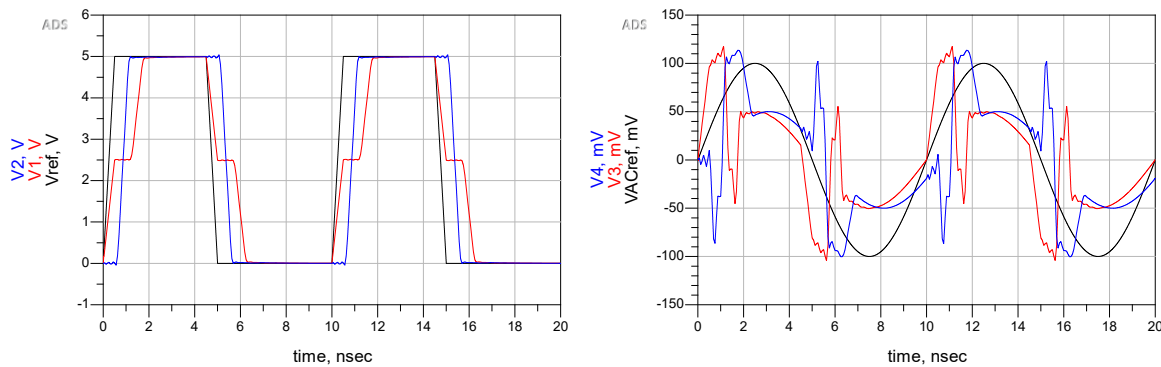


Figure 18 : Signaux avec longueur doublée (L=100mm)

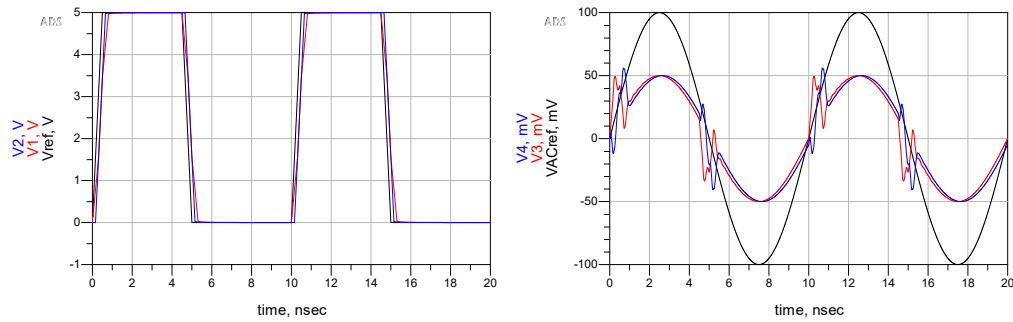


Figure 19 : Signaux avec moitié longueur (L=25mm)

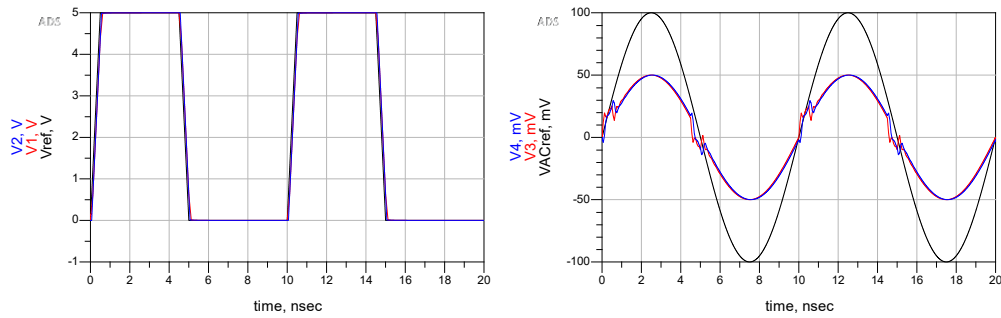


Figure 20 : Signaux avec longueur minimale (L=10mm)

La deuxième étape est d'ajouter des VIAs de mise à la terre entre les deux lignes. Pour ce faire en simulation, le bloc des deux lignes sera divisée en deux et aura l'ajout d'une 3^e ligne (Car le logiciel ne permet pas de simuler des VIAs au début, milieu et fin de la ligne autrement). Cette troisième ligne sera insérée dans l'espace entre les deux lignes existantes. Pour faire simple, l'espace de 3mm entre les lignes sera divisé équitablement entre des espaces et la ligne (1 espace de 1mm, une ligne de largeur de 1mm et un autre espace de 1mm). Il est possible de voir l'impact important de cet ajout sur les pics dans le signal sinusoïdal (diminution importante du cross-talk (diaphonie) car on vient en quelques sortes « shielder » nos lignes).

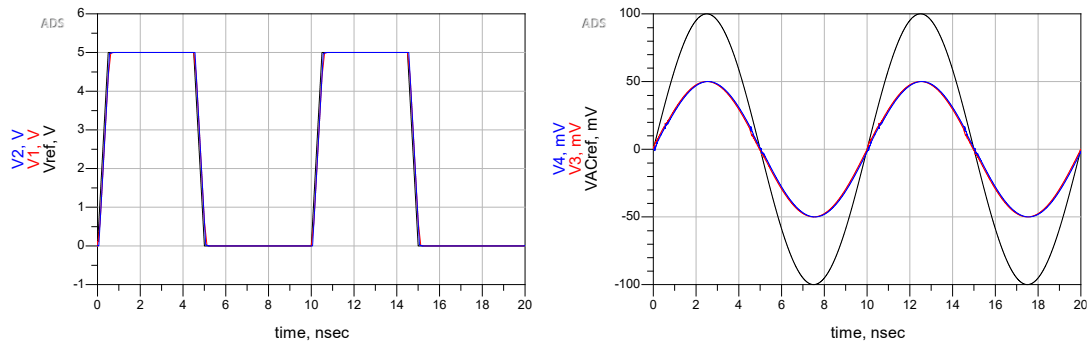


Figure 21 : Signaux avec VIAs et ligne de mise à la terre ajoutés entre les lignes.

Finalement, en guise de dernière étape, il est possible d'ajouter un condensateur en parallèle sur le point V4 afin de filtrer le signal davantage. Après quelques tests (début à 1pF avec augmentation de 1pF par itération), il fut décidé qu'un condensateur de valeur de 15pF était suffisant et que la qualité du signal sortant était suffisante. En conclusion, après toutes ces étapes, le circuit [Figure 22], les signaux de sortie sont obtenus [Figure 23] et il est possible de démontrer le respect du critère de 1mV maximal de bruit avec la quantification du bruit [Figure 24].

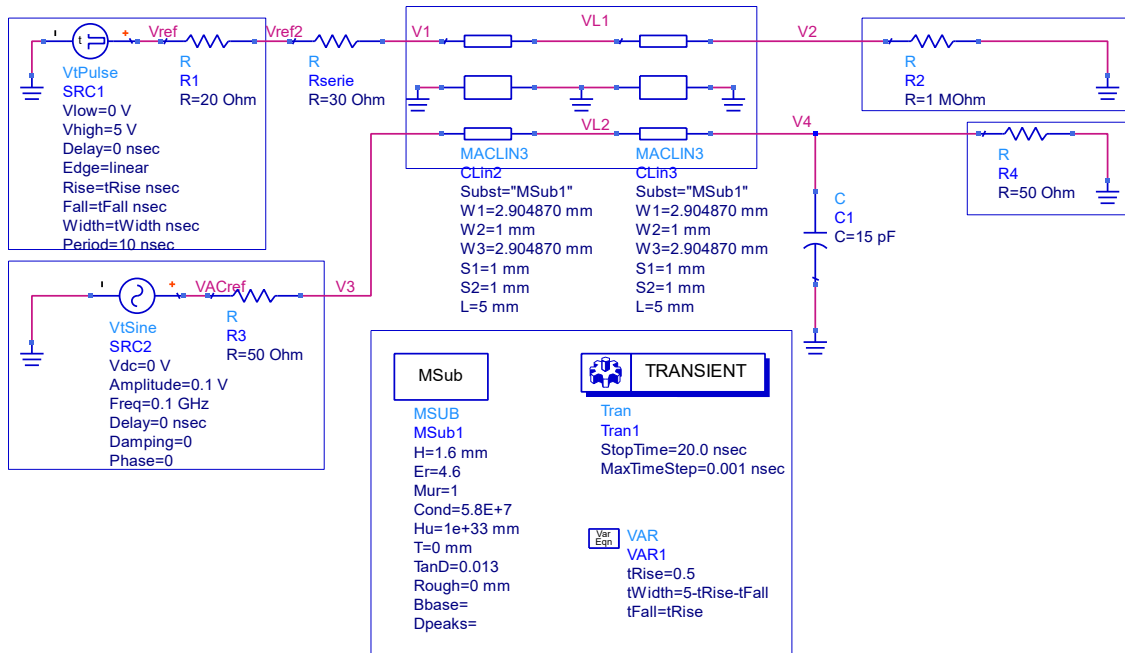


Figure 22 : Circuit Final

4.2 DÉMONSTRATION PAR SIMULATION

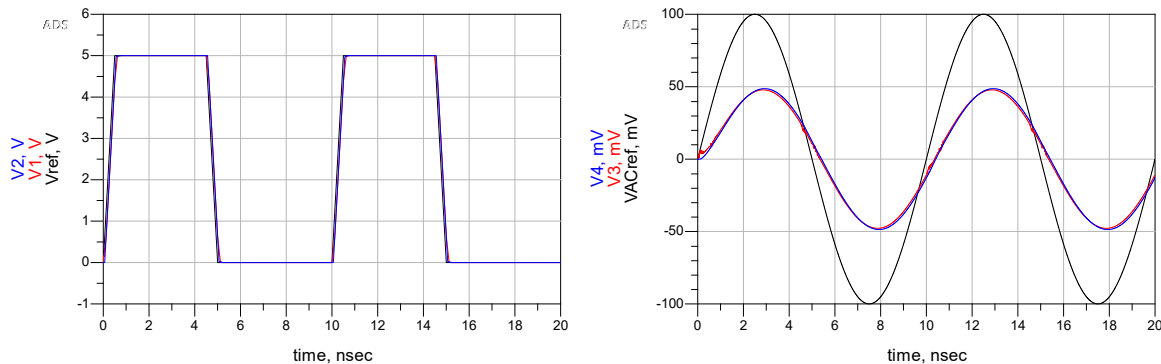


Figure 23 : Tensions du circuit Final

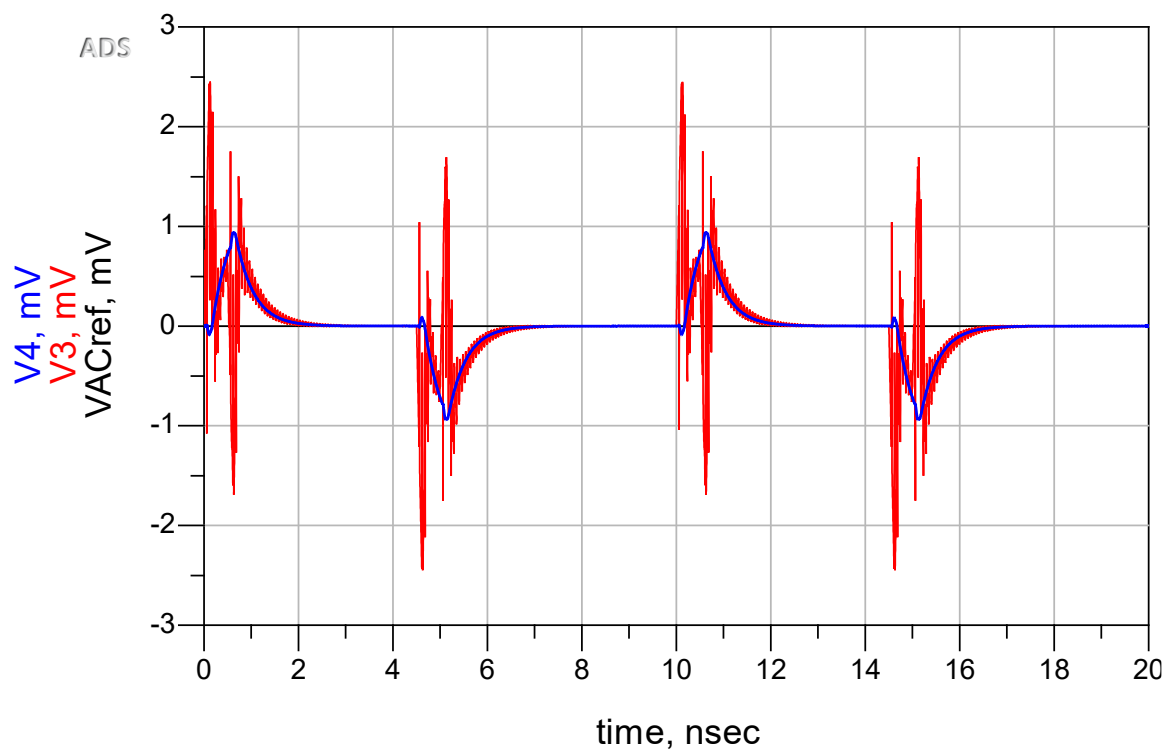


Figure 24 : Quantification du bruit final

5. CONCLUSION

Comme l'image l'indique, on n'est pas obligé de refaire un nouveau design complet du PCB car il n'y a pas beaucoup de changements. On peut tout simplement faire une révision pour ajouter la ligne de mise à la terre et les VIAs après avoir légèrement déplacé la ligne 4.

Réalisations de PCB

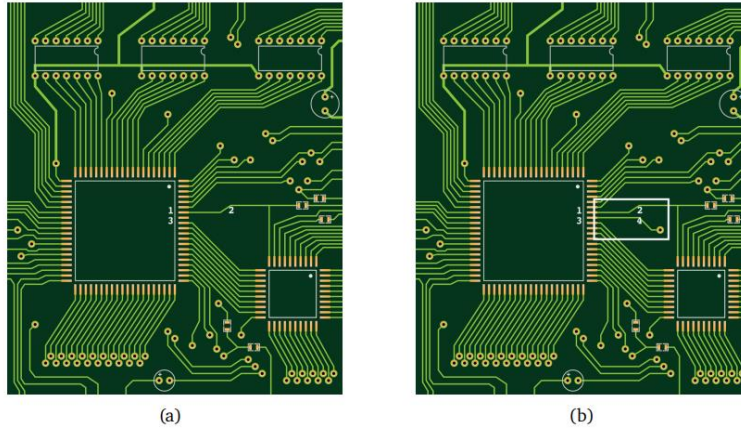


Figure 25 : PCBs proposés initialement (a) brisé (b) partiellement fonctionnel

6. RÉFÉRENCES

There are no sources in the current document.

Annexe A SCHÉMA DE RÉFLEXION DANS LA LIGNE

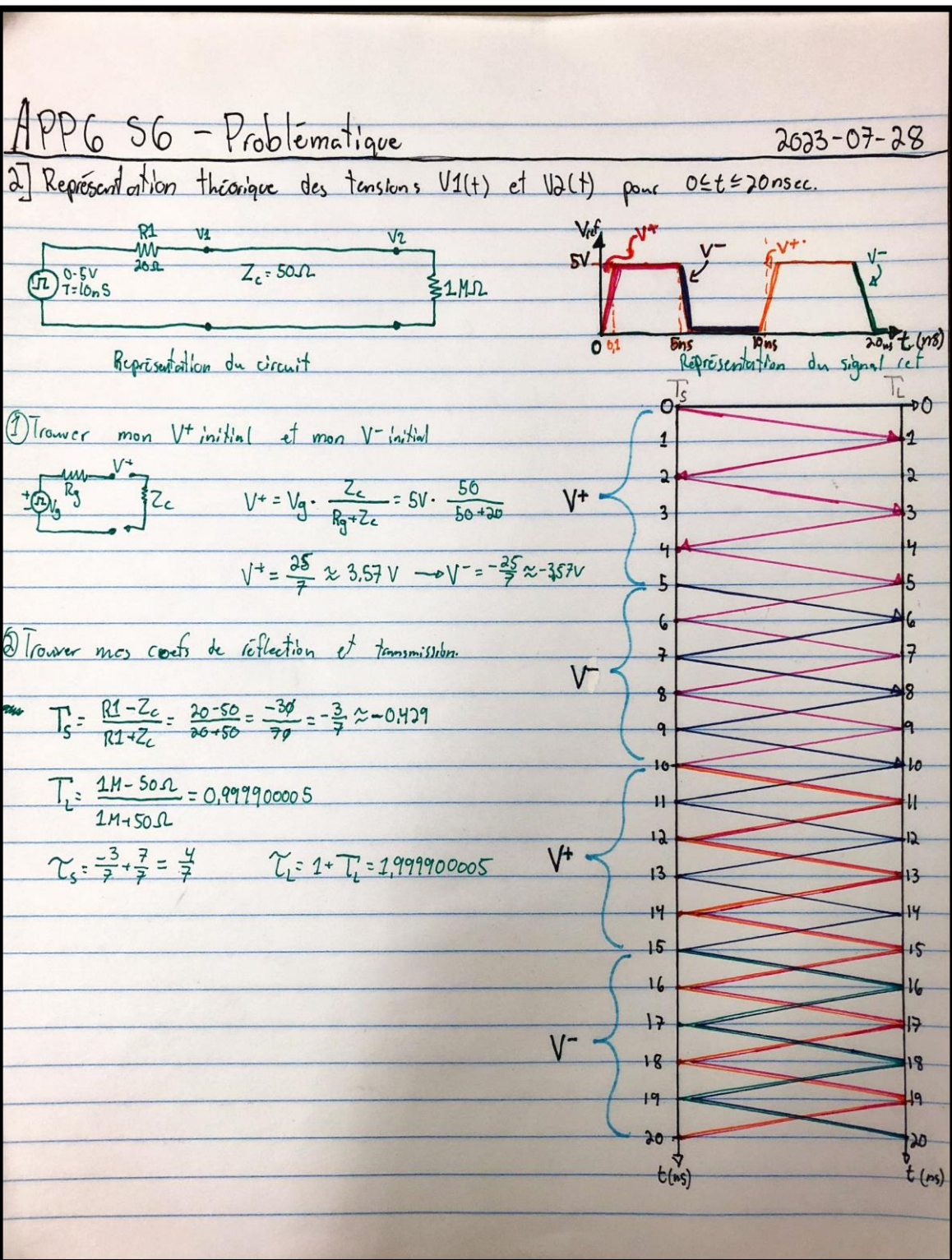


Figure 26 : Schéma de réflexion et calculs

Annexe B CODE MATLAB DU CALCUL DE V1 ET V2

```
% == Code Principal ==
Zc = 50;
R1 = 20;
R2 = 1e6;
Vg = 5;

Vplus = Vg*(Zc/(R1+Zc));
Vmoins = -Vplus;
Ts = (R1 - Zc)/(R1 + Zc);
ts = 1 + Ts;
Tl = (R2 - Zc)/(R2 + Zc);
tl = 1 + Tl;

Vref = [5 5 5 5 5 0 0 0 0 0 5 5 5 5 5 0 0 0 0 0];
time = 0: 1: 20;
for t = 0: 1: 20
    Vreflet_plus(t+1) = Calcul_reflets(t,Vreflet_plus,Ts,Tl,Vplus);
    Vreflet_moins(t+1) = Calcul_reflets(t,Vreflet_moins,Ts,Tl,Vmoins);
    [V1_plus(t+1),V2_plus(t+1)] = Calculs_V1_V2(t,V1_plus,V2_plus,Vreflet_plus,tl,Vplus);
    [V1_moins(t+1),V2_moins(t+1)] = Calculs_V1_V2(t,V1_moins,V2_moins,Vreflet_moins,tl,Vmoins);
end

V1_1pulse = V1_plus;
V1_1pulse(6:end) = V1_plus(6:end) + V1_moins(1:(end-5));
V2_1pulse = V2_plus;
V2_1pulse(6:end) = V2_plus(6:end) + V2_moins(1:(end-5));

V1_complet = V1_1pulse;
V1_complet(11:end) = V1_complet(11:end) + V1_1pulse(1:(end-10));
V2_complet = V2_1pulse;
V2_complet(11:end) = V2_complet(11:end) + V2_1pulse(1:(end-10));
```

Figure 27 : Code Principal calcul V1 V2

```
% == Calcul_reflets ==
function f = Calcul_reflets(t,Vreflet,Ts,Tl,V)
if t == 0
    f = V;
else
    if 0 == mod(t,2)
        f = Vreflet(t)*Ts;
    else
        f = Vreflet(t)*Tl;
    end
end
end
end
```

Figure 28 : Calcul Tensions reflétées (pour V1 et V2)

```

% == Calculs_V1_V2 ==
function [V1r,V2r] = Calculs_V1_V2(t,V1,V2,Vreflet,tl,V)
if t == 0
    V1r = V;
    V2r = 0;
else
    if 0 == mod(t,2)
        V1r = V1(t) - Vreflet(t+1);
        V2r = V2(t);
    else
        V1r = V1(t);
        V2r = Vreflet(t+1)*tl + V2(t);
    end
end
end
end

```

Figure 29 : Calcul des valeurs de tension V1 et V2 pour cas individuels

Annexe C LABORATOIRE

APP6 SG - Laboratoire

26 Juillet 2023

7.2.1] Calculs (Inductance en H/m du câble, vitesse propagation soit avec ϵ_r ou avec Diamètre interne: 0,94mm Diamètre externe: 2,10mm Impédance caractéristique: $Z_0 = 50 \Omega$ LC).
Vitesse propagation = 78% (% de c_0) Capacité distribuée: 85,3 pF/m Constante diélectrique = 1,65

Impédance
 $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \Rightarrow \cancel{L} = Z_0^2 \cdot C \Rightarrow L = 50^2 \cdot 85,3 \text{ pF/m} \Rightarrow L = 0,21325 \mu\text{H/m}$

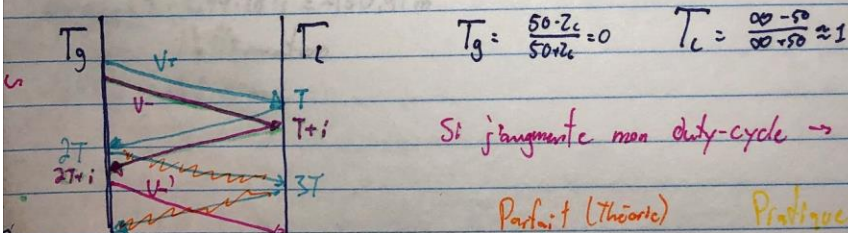
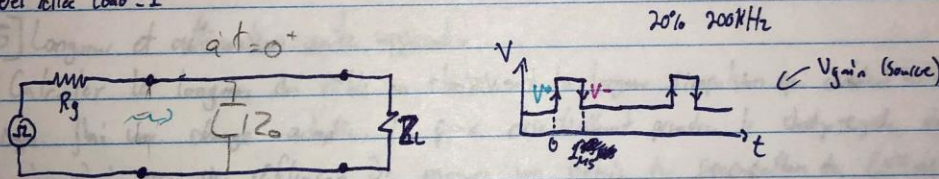
Vitesse 1
 $V = 1/\sqrt{LC} \rightarrow V = 1/\sqrt{0,21325 \mu\text{H/m} \cdot 85,3 \text{ pF/m}} \rightarrow V \approx 234\,466\,588,5 \text{ m/s}$

Vitesse 2
 $V = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \# \text{ Je suppose ligne homogène } V = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{\sqrt{1,65}} \Rightarrow V \approx 233\,549\,683,2 \text{ m/s}$

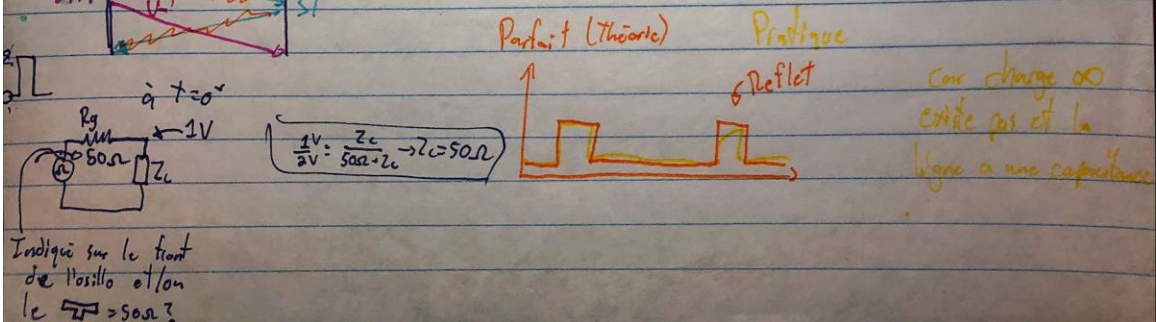
7.3.1 Montage

Coef source = 0 ~~car adapté~~ car adapté

Coef réflexion = 1





Si j'augmente mon duty-cycle $\rightarrow V^- \rightarrow V^+$



7.4] Longueur et atténuation du câble

7.4.2] Mesures

A] Calculer la longueur du câble en choisissant la largeur d'impulsion qui convient le mieux.

On commence par choisir une largeur de 20% car si on l'augmente, ça fait comme au précédent num où on passe de ~~trapezoidal~~  à . On mesure ensuite le temps pour que la réflexion arrive. On a mesuré ~ 250 ns.

m/s . s

$$233549683,2 \text{ m/s} \cdot 1250 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 291,937 \text{ m} \rightarrow \text{1 aller \& 1 retour} \rightarrow \text{Donc } L = 145,97 \text{ m}$$

$$V = \frac{L}{T}$$

$$L = V \times T$$

$$L = 2335 \times 10^8 \times$$

B] Calculer l'atténuation du câble ~~et l'atténuation~~ en dB/100m. $Att(\text{dB}) = -20 \log\left(\frac{V_r}{V_i}\right)$

$$Att(\text{dB}) = -20 \log\left(\frac{2V}{2V}\right) = 6,0206 \text{ dB (pour 145m)} \rightarrow \sim 4,1245 \text{ dB/100m}$$

7.5] Longueur et atténuation: autre approche.

A] Calculer la longueur du câble en choisissant la largeur d'impulsion qui convient le mieux.

Puisque j'ai une charge adaptée, je peux essentiellement prendre le duty-cycle de mon signal car je n'ai pas de réflexion. Je mesure un délai de propagation de 644 ns.

$$233549683,2 \cdot 644 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 150,41 \text{ m}$$

B] Calculer l'atténuation

$$Att \approx 4 \text{ dB/100m}$$

7.6] Atténuation du câble en fonction de la fréquence.

7.6.2] Mesures

Mesurer l'atténuation du câble en dB/100m en utilisant le montage de la figure 12 et la formule donnée en 7.4. pour différents points en fréquence entre 100kHz à 10MHz.

f	100kHz	200kHz	300kHz	400kHz	500kHz	600kHz	700kHz	800kHz	900kHz	1000kHz
diff (top)	368mV	380mV	380mV	380mV	364mV	356mV	348mV	348mV	348mV	368mV

Doublet

f	1MHz	2MHz	3MHz	4MHz	5MHz	6MHz	7MHz	8MHz	9MHz	10MHz
diff (top)	368mV	384mV	384mV	388mV	412mV	412mV	412mV	412mV	420mV	420mV

f	0.1MHz	0.2MHz	0.3MHz	0.4MHz	0.5MHz	0.6MHz	0.7MHz	0.8MHz	0.9MHz	1MHz	2MHz	3MHz	4MHz	5MHz	6MHz	7MHz	8MHz	9MHz	10MHz
1	572mV	584mV	584mV	572mV	556mV	548mV	540mV	540mV	556mV	556mV	540mV	540mV	540mV	540mV	540mV	540mV	540mV	540mV	536mV
2	204mV	204mV	204mV	192mV	192mV	192mV	192mV	192mV	192mV	188mV	188mV	156mV	152mV	128mV	128mV	128mV	128mV	116mV	116mV
#	5.95dB	6.07dB	6.07dB	6.30dB	6.14dB	6.06dB	5.97dB	5.97dB	5.97dB	6.26dB	6.77dB	7.17dB	7.32dB	8.31dB	8.31dB	8.31dB	8.31dB	8.82dB	8.82dB