

# heig-vd

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion  
du Canton de Vaud

Département Technologies Industrielles

Unité EAN2

# Electronique analogique

## Protocoles de laboratoire

i nstitut d'  
**A**utomatisation  
i ndustrielle



Prof. Freddy Mudry



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Quelques informations</b>	<b>3</b>
1.1	Programme du laboratoire EAN . . . . .	3
1.2	Comment tenir un cahier de laboratoire? . . . . .	3
1.2.1	Forme à respecter . . . . .	3
1.2.2	Résumé de la structure demandée . . . . .	4
1.2.3	Point important . . . . .	5
1.3	Evaluation de votre travail . . . . .	5
1.4	Résultats expérimentaux et Matlab . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Réalisation d'un filtre passe-bas</b>	<b>9</b>
2.1	Réalisation d'un filtre de Bessel . . . . .	9
2.2	Simulation . . . . .	9
2.3	Mesures . . . . .	10
2.3.1	Réponse indicielle . . . . .	10
2.3.2	Réponse fréquentielle . . . . .	10
2.4	Dispersion des caractéristiques . . . . .	11
2.5	Analyse des résultats . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Quelques circuits avec comparateurs</b>	<b>13</b>
3.1	Comparateur . . . . .	13
3.1.1	Calculs . . . . .	13
3.1.2	Simulation . . . . .	13
3.1.3	Mesures . . . . .	14
3.2	Générateur d'impulsions . . . . .	14
3.3	Modulateur de largeur d'impulsions . . . . .	14
3.3.1	Théorie . . . . .	14
3.3.2	Graphes . . . . .	15
3.3.3	Simulation . . . . .	15
3.3.4	Expérimentation . . . . .	16
3.4	Analyse des résultats . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Générateurs de signaux</b>	<b>19</b>
4.1	Introduction . . . . .	19
4.2	Analyse et simulation . . . . .	19
4.2.1	Signaux carrés et triangulaires . . . . .	19
4.2.2	Signal sinusoïdal . . . . .	19
4.2.3	Impulsions rectangulaires . . . . .	20
4.2.4	Analyse spectrale . . . . .	20
4.3	Mesures . . . . .	21

*Table des matières*

4.3.1	Signaux temporels . . . . .	21
4.3.2	Analyse spectrale . . . . .	21
4.4	Analyse des résultats . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Oscillateurs (VCO et Wien)</b>	<b>25</b>
5.1	Circuit VCO unipolaire . . . . .	25
5.1.1	Étude théorique . . . . .	25
5.1.2	Simulation . . . . .	26
5.1.3	Réalisation et mesures . . . . .	26
5.1.4	Analyse des résultats . . . . .	26
5.2	Oscillateur de Wien . . . . .	27
5.2.1	Analyse du circuit . . . . .	27
5.2.2	Simulation . . . . .	28
5.2.3	Réalisation et mesures . . . . .	29
5.2.4	Analyse des résultats . . . . .	29

# 1 Quelques informations

## 1.1 Programme du laboratoire EAN

<b>EAN1</b> : Été, trimestres 3+4 = 7+7 semaines			
<b>Laboratoire</b> : 2L+4L hebdo. = 42 périodes	Périodes	Total	Semaines
Introduction à Spice / Matlab	10	10	1-5
Mesures et analyse DC	4	14	6-7
Mesure et analyse AC	4	18	8
Mesure et modélisation d'une diode	4	22	9
Circuits à transistors	8	30	10-11
A.O. : entre l'idéal et la réalité	8	38	12-13
Application linéaire d'un A.O.	4	42	14
<b>EAN2</b> : Hiver, trimestre 5 = 8 semaines			
<b>Laboratoire</b> : 4 pér. hebdo. = 32 périodes	Périodes	Total	Semaines
Réalisation et mesure d'un filtre actif	4	4	2
Comparateurs, bascules, circuits PWM	8	12	3-4
Générateurs de signaux	8	20	5-6
Oscillateurs (VCO et Wien)	8	28	7-8

## 1.2 Comment tenir un cahier de laboratoire ?

Afin que les résultats d'une expérience soient utilisables par la suite, il est nécessaire de prendre soigneusement note de ce qui se passe en cours de manipulation. Pour éviter des oublis ou des notes disparates et incomplètes, il faut se fixer une ligne de conduite précise et stricte.

Pour ce faire, procurez-vous un cahier quadrillé 5mm de format A4 que vous réserverez uniquement à ce laboratoire. Dans ce cahier, chaque nouvelle manipulation débutera en haut d'une page de droite et vous y écrirez en respectant la présentation et la structure proposées ci-après.

### 1.2.1 Forme à respecter

Pour chaque manipulation, l'ensemble des dix points suivants figureront obligatoirement :

1. la date et le nom des personnes participant à la manipulation ;

## 1 Quelques informations

2. le titre de la manipulation (souligné);
3. les objectifs à atteindre;
4. une description de l'expérience comprenant les schémas et les calculs préalables;
5. la simulation correspondante avec schémas et résultats graphiques ou calculés;
6. la présentation des mesures effectuées doit être précise et complète; celle-ci doit se faire en donnant :
  - a) le schéma de branchement des instruments;
  - b) le type et la précision des instruments non-standard;
  - c) les graphes découlant des mesures;
7. les tableaux de mesures sont à éviter car dans la plupart des cas on peut **porter les résultats directement sur les graphes de simulation** dont les échelles ont été correctement choisies au préalable;
8. afin de pouvoir faire une **analyse critique** des résultats théoriques, simulés et expérimentaux, ceux-ci doivent être présentés dans un **tableau comparatif**; l'analyse doit être claire, précise, argumentée et aussi complète que possible;
9. le paragraphe de conclusion sera concis et original; il peut inclure des propositions d'amélioration de la manipulation;
10. la manipulation se termine en rappelant la date et l'heure de la fin du travail et doit être signée par les expérimentateurs.

### 1.2.2 Résumé de la structure demandée

Date : jj.mm.aa

Noms : Dupont E. / Durand M.

#### TITRE DE LA MANIPULATION

- 1) **Objectifs**
- 2) **Description**  
Schémas  
Calculs
- 3) **Simulation**  
Schéma de simulation  
Résultats de simulation
- 4) **Mesures**  
Schémas de mesures  
Liste des appareils non-standard et de leur précision  
Graphes et résultats des mesures
- 5) **Analyse des résultats avec tableau comparatif**
- 6) **Conclusions**

Date : jj. mm. aa

Heure : hh. mm

Signatures : xxxx et yyyy

**Remarque** Comme un cahier de laboratoire s'écrit au fur et à mesure de la progression du travail, il est évident que des erreurs y apparaîtront. Dans ce cas, il suffit de séparer ce qui est erroné par deux lignes horizontales et de biffer ce qui est incorrect. L'usage intensif de la gomme n'apporte rien, bien au contraire.

### 1.2.3 Point important

Parmi les points mentionnés ci-dessus, il y en a un qui est particulièrement important : il s'agit de **l'analyse de l'ensemble des résultats obtenus**. C'est en effet dans cette partie que vous devrez faire preuve d'imagination, de créativité et d'esprit critique. C'est donc ici qu'apparaîtra votre personnalité et que vous montrerez votre **capacité à analyser avec rigueur** ce que vous avez observé et mesuré.

Ce point est suffisamment important pour que, dans l'appréciation de votre travail, il soit prépondérant par rapport aux autres. Vous devrez donc, pour éviter une mauvaise évaluation, **vérifier que les hypothèses formulées expliquent numériquement les résultats obtenus**. En particulier, une remarque telle que : "Les différences observées sont dues au fait que le modèle ne coïncide pas avec la réalité" n'a aucun intérêt si vous ne précisez pas où se situent ces différences et quels sont leurs effets.

## 1.3 Evaluation de votre travail

L'appréciation d'un rapport est particulièrement difficile et subjective car elle dépend essentiellement du sentiment que laisse la première lecture de celui-ci et assez peu du travail qui a été réellement fourni au laboratoire ou pour sa rédaction. Il ne faut cependant pas oublier que, malgré cela, une grande partie de la communication professionnelle se fait au travers de rapports et que, par conséquent, le soin apporté à la rédaction de ceux-ci est important.

Tenant compte de ces remarques, votre rapport sera lu en annotant ses différentes parties à l'aide des symboles ci-dessous qui seront généralement accompagnés de remarques explicatives. La note attribuée pour votre travail (au demi-point près) dépendra de ces appréciations et de la qualité des points suivants. Elle dépassera rarement 5.5 car un demi point est réservé à l'apport personnel se traduisant par une idée originale ou des calculs avancés. N'oubliez pas que **l'analyse des résultats sera surpondérée** par rapport aux autres éléments et qu'un manque de rigueur sera sanctionné par une insuffisance.

Éléments considérés	Symboles	Appréciations	Note
travail effectué		excellent	6.0
présentation et structure	$\oplus$	très bien	5.5
description et calculs	+	bien	5.0
simulation	✓	suffisant	4.5
qualité des mesures	~	passable	4.0
analyse des résultats	$\ominus$	insuffisant	3.5
apport personnel		mauvais	$\leq 3.0$

## 1 Quelques informations

Comme déjà dit, l'évaluation de votre travail n'est pas chose aisée et elle est particulièrement subjective. C'est pourquoi, si vous éprouvez le sentiment d'avoir été injustement noté, *il est de votre devoir de le dire et d'en discuter*. Une bonne argumentation peut montrer une meilleure connaissance de la manipulation que ne l'a laissé accroire votre rapport.

### 1.4 Résultats expérimentaux et Matlab

Les résultats théoriques et expérimentaux sont avantageusement et facilement mis en valeur avec Matlab. Comme exemple, on présente ci-dessous l'étude d'un filtre passe-bas réalisé avec un circuit RC décrit par sa fonction de transfert

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = RC$$

Une illustration de l'étude des réponses fréquentielle et indicielle est donnée à la figure 1.1. On notera que les points expérimentaux sont bien mis en évidence et qu'ils ne doivent pas être reliés entre eux. Les courbes qui sont tracées résultent du modèle théorique du circuit. On retiendra donc le point important suivant :

**DANS UN GRAPHE, IL N'Y A  
DE POINTS QU'EXPÉRIMENTAUX ET  
DE COURBES QUE THÉORIQUES.**

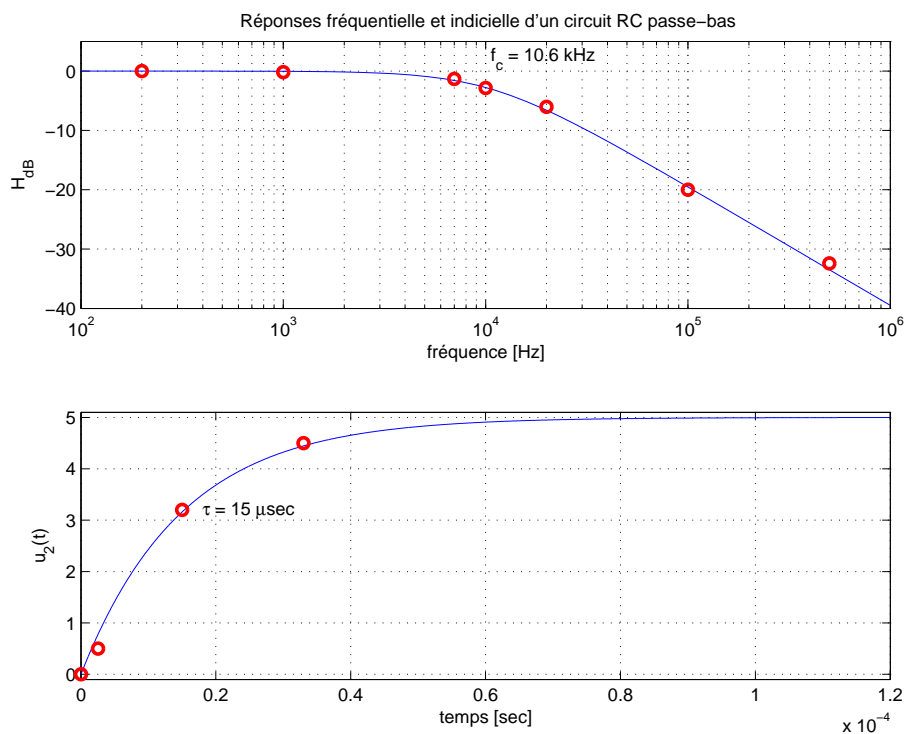


FIG. 1.1: Résultats théoriques et expérimentaux

Voici le fichier Matlab permettant de présenter ces résultats.



```

% initialisation Matlab
clear all; close all; clc;
format compact; format short g;

% fonction de transfert du circuit
R = 15e3; C = 1e-9;
tau = R*C, wc = 1/(R*C), fc = wc/2/pi
num = [0,1]; den = [R*C, 1];
H_RC = tf(num,den);

% réponse fréquentielle
fmin = 100; fmax = 1e6;
ff = logspace(log10(fmin),log10(fmax),500);
Hjw = freqs(num,den, 2*pi*ff);
module = abs(Hjw); phase = angle(Hjw);
% mesures
U1 = 5; % V
f_mes = [0.2, 1, 7, 10, 20, 100, 500]*1e3; % Hz
U2_mes = [5, 4.9, 4.3 3.6, 2.5, 0.5, 0.12]; % V
Hdb_mes = 20*log10(U2_mes/U1);

% réponse indicielle
U1 = 5; % V
tmax = 8*R*C; Npts = 1000; dt = tmax/Npts;
tt = 0 :dt :tmax-dt;
u1t = U1*ones(size(tt)); u1t(1)=0;
u2t = lsim(num,den, u1t,tt);
% mesures
u2t_mes = [0, 0.5, 3.2, 4.5];
tt_mes = [0, 2.5, 15, 33]*1e-6;

% graphes
figure;
subplot(2,1,1);
semilogx(ff, 20*log10(module)); hold on;
semilogx(f_mes,Hdb_mes,'or'); grid on;
axis([fmin,fmax,-40,5]);
% informations
title('Réponses fréquentielle et indicielle d'un circuit RC passe-bas');
xlabel('fréquence [Hz]'); ylabel('H_{dB}');
texte = ['f_c = ', num2str(fc/1000,3), ' kHz'];
text(fc,2,texte);
subplot(2,1,2);
plot(tt,u2t); hold on;
plot(tt_mes, u2t_mes, 'or'); grid on;
axis([0,tmax, -0.1,5.1]);
xlabel('temps [sec]'); ylabel('u_2(t)');
texte = ['\tau = ', num2str(tau*1e6,3), ' \musec'];
text(1.2*tau,3.22,texte);

% création d'un fichier eps contenant la figure
print -depsc rc_pbas.eps

```

## 1 Quelques informations

## 2 Réalisation d'un filtre passe-bas

**Objectif** Réaliser un filtre passe-bas et mesurer ses réponses indicielle et fréquentielle.

### 2.1 Réalisation d'un filtre de Bessel

1. Aidez-vous des notions développées au cours pour calculer la valeur des composants d'un filtre passe-bas de Bessel d'ordre 3 possédant une fréquence de coupure  $f_c = 1kHz$ .
2. Choisissez des valeurs de composants aussi proches que possibles des valeurs standard ; veillez à ne pas choisir des valeurs trop extrêmes. Afin de permettre une comparaison objective entre les résultats de simulation et expérimentaux, choisissez des composants de précision 1%.
3. La caractéristique essentielle d'un filtre de Bessel est la linéarité de la phase ou, mieux, la constance du temps de propagation  $t_p(\omega)$  défini de la manière suivante

$$t_p(\omega) = -\frac{\varphi(\omega) [rad]}{\omega}$$

On peut alors montrer que le temps de propagation d'un filtre passe-bas d'ordre 3 vaut théoriquement

$$t_p = -\left. \frac{\varphi(\omega) [rad]}{\omega} \right|_{\omega \rightarrow 0} = \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{Q_0 \omega_0}$$

4. Partant des valeurs normalisées choisies pour les composants, calculez les valeurs réelles des pulsations caractéristiques et facteur de qualité ; chiffrez l'erreur relative ainsi commise. Que vaut le temps de propagation de votre circuit ?

### 2.2 Simulation

Simulez votre circuit avec les valeurs choisies pour les éléments, puis :

1. Tracez la réponse fréquentielle ( $10Hz < f < 100kHz$ ) (amplitude et phase sur 2 graphes différents, même écran). Pour le Bode d'amplitude, fixez l'échelle entre -60dB et +5dB. Quelle est la bande passante de votre filtre ?

## 2 Réalisation d'un filtre passe-bas

2. Si on travaille avec la fréquence plutôt qu'avec la pulsation, le temps de propagation  $t_p$  doit être calculé de la manière suivante

$$t_p(f) = -\frac{\varphi [\text{rad}]}{\omega} = -\frac{1}{360} \frac{\varphi [\text{deg}]}{f}$$

- a) tracez la phase dans un **diagramme linéaire** entre 0 et  $2f_c$  sur un premier graphe ;
  - b) tracez le temps de propagation avec la commande `-p(V(out)/V(in))/360/frequency` sur un deuxième graphe (même écran) ;
  - c) que vaut le temps de propagation pour des fréquences comprises entre 0 et  $f_c$  ? Idem, entre 0 et  $2f_c$  ?
3. Tracez la réponse indicielle ( $0 < t < 2.5\text{msec}$ ), puis :
    - a) avec le curseur, relevez les temps  $t_{10\%}$ ,  $t_{50\%}$ ,  $t_{90\%}$  ;
    - b) parmi ces 3 valeurs, y en a-t-il une susceptible de mesurer le temps de propagation ?
    - c) que vaut le temps de montée  $t_m \equiv t_{90\%} - t_{10\%}$  ?

## 2.3 Mesures

Câblez votre filtre, puis vérifiez vos résultats temporels et fréquentiels.

### 2.3.1 Réponse indicielle

Sur la réponse indicielle vue à l'oscilloscope, relevez avec le curseur les temps caractéristiques  $t_{10\%}$ ,  $t_{50\%}$ ,  $t_{90\%}$  puis portez-les sur le graphe de simulation. Commentez ces résultats.

### 2.3.2 Réponse fréquentielle

1. Quel signal (forme et amplitude) choisissez-vous pour mesurer la réponse fréquentielle de votre filtre ?
2. Avec le multimètre numérique, mesurez quelques points de la réponse fréquentielle en amplitude (par exemple, 100Hz, 300Hz,  $f_c$ , 3kHz, 10kHz) et portez-les sur le graphe de simulation.
3. Sur l'oscilloscope, observez le temps de propagation ; pour le mesurer correctement, quels réglages devez-vous faire soigneusement ? Pour une dizaine de fréquences réparties linéairement entre 0 et  $2f_c$ , mesurez le temps de propagation. Portez ces résultats sur le diagramme linéaire de la simulation.
4. Commentez les différences éventuelles.

## 2.4 Dispersion des caractéristiques

Si vous avez ou prenez le temps, vérifiez la sensibilité de votre circuit à la variation de la valeur des composants. Les tolérances sont définies en % dans la fenêtre du composant ; pour une capacité, on donne par exemple :

```
PartName : C    TOLERANCE=5%
```

Celle-ci peut se faire à l'aide de l'analyse de Monte-Carlo (Analysis / Set Up / Monte Carlo) qui consiste à tirer au hasard la valeur des éléments dans le domaine de tolérance proposé. Observez la dispersion des réponses temporelles et des temps de propagation sur cinq ou dix essais.

## 2.5 Analyse des résultats

Après avoir établi un tableau comparatif, analysez et critiquez les résultats simulés et expérimentaux.

**Durée** 1 séance

## 2 Réalisation d'un filtre passe-bas

# 3 Quelques circuits avec comparateurs

**Objectif** Réaliser des circuits à comparateurs, puis analyser et mesurer le comportement d'un modulateur de largeur d'impulsions.

## 3.1 Comparateur

### 3.1.1 Calculs

On désire réaliser le comparateur non-inverseur de la figure 3.1 commutant lorsque la tension d'entrée passe par 4 et 6V. Calculez les résistances du circuit en prenant  $|V_{sat}| = V_{CC} - 1V$ ; évitez de prendre des valeurs inférieures à  $10k\Omega$ . Après avoir choisi des résistances normalisées, recalculer les seuils de basculement. Que vaudra le rapport cyclique de votre comparateur si la tension d'entrée est une sinusoïde d'amplitude 10V ?

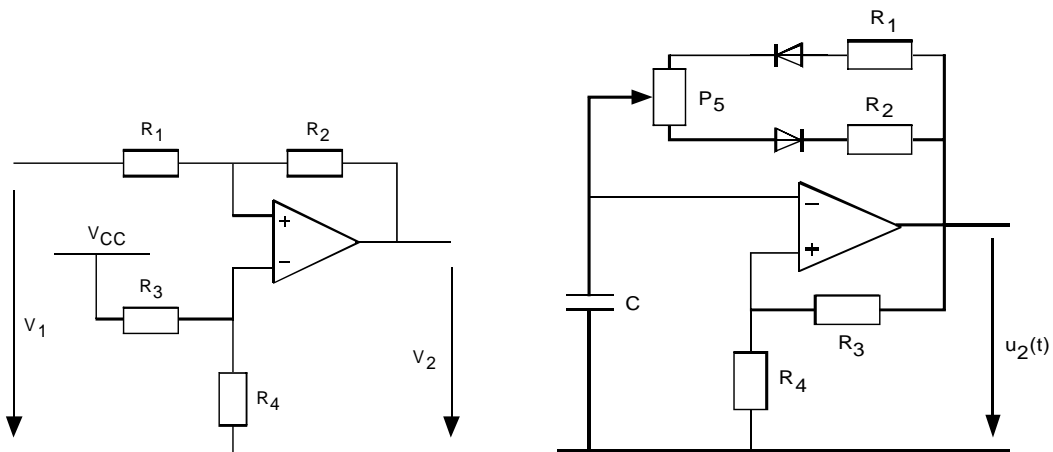


FIG. 3.1: Comparateur et générateur d'impulsions

### 3.1.2 Simulation

Créer le fichier de simulation du circuit considéré en prenant pour  $u_1(t)$  un générateur sinusoïdal de fréquence 100Hz et d'amplitude 10V. Observer les tensions

### 3 Quelques circuits avec comparateurs

d'entrée  $u_1(t)$  et de sortie  $u_2(t)$  ainsi que la caractéristique de transfert  $U_2(U_1)$ . Mesurez les tensions de saturation de l'AO, les seuils de commutation et le rapport cyclique de votre circuit.

Répétez vos observations de la caractéristique de transfert  $U_2(U_1)$  à  $f = 2\text{kHz}$  et  $f = 10\text{kHz}$ ; quelles sont vos conclusions ?

#### 3.1.3 Mesures

Câblez votre circuit. Appliquez-lui un signal sinusoïdal de fréquence 100Hz et d'amplitude 10V. Mesurez les tensions de saturation de l'AO. Observez les tensions d'entrée  $u_1(t)$  et de sortie  $u_2(t)$ . Mesurez les seuils de commutation et le rapport cyclique.

Augmentez la fréquence du signal; observez  $u_1(t)$  et  $u_2(t)$ . Répétez vos observations en mode X-Y. Mesurez les seuils de commutation à  $f = 2\text{kHz}$  et  $f = 10\text{kHz}$ ; quelles sont vos conclusions ? Relevez les graphes-écrans intéressants.

## 3.2 Générateur d'impulsions

Pour le schéma du générateur d'impulsions (figure 3.1), on prendra des résistances de  $12\text{ k}\Omega$ , un potentiomètre de  $100\text{ k}\Omega$  et des diodes 1N4148. Calculez la valeur de la capacité C pour que le circuit oscille avec une période de 1 ms. Quelles seront les limites du rapport cyclique ?

Simulez votre circuit. Pour que l'oscillateur démarre, n'oubliez pas de placer une condition initiale sur la capacité. Vérifiez l'exactitude de vos calculs.

Câblez le circuit; mesurez les périodes minimum et maximum en variant  $R_{pot}$ . Mesurez les valeurs limites du rapport cyclique. Relevez les graphes-écrans intéressants.

## 3.3 Modulateur de largeur d'impulsions

Les modulateurs de largeur d'impulsions (Pulse Width Modulator = PWM) sont fréquemment utilisés en électronique de puissance pour la commande de moteur, par exemple. Le circuit proposé dans la figure 3.2 permet d'en découvrir le principe à savoir que le rapport cyclique peut être modifié à l'aide d'une tension de commande; ici la tension d'entrée  $V_{ref}$ .

### 3.3.1 Théorie

Esquissez la caractéristique de transfert du comparateur. Considérant des niveaux de sortie  $V_H$  et  $V_L$ , calculez littéralement les seuils de commutation  $V_{T1}$  et  $V_{T2}$  du circuit en fonction de  $V_{ref}$ . Esquissez le comportement temporel du circuit en traçant  $u_{C1}(t)$  et  $u_2(t)$ . Calculez les temps  $t_H$  et  $t_L$ , la période d'oscillation T ainsi que le rapport cyclique  $\eta = t_H/T$  du circuit.



Admettant que les niveaux de saturation de l'AO sont à 1 volt des tensions d'alimentation 0 et 15V et que les résistances valent  $R_5 = 15k\Omega$  et  $R_{2,3,4} = 150k\Omega$ , calculez  $R_1$  et  $C_1$  pour que le circuit oscille à 10kHz lorsque  $V_{ref} = V_{CC}/2$ .

### 3.3.2 Graphes

L'utilisation de Matlab (voir fichier annexé) facilitera grandement votre tâche pour dessiner la période  $T$  et le rapport cyclique  $\eta$  du PWM en fonction de  $V_{ref}$ .

1. Tracez ces deux graphes.
2. Commentez la dépendance de la période et du rapport cyclique par rapport à la tension  $V_{ref}$ .
3. Que vaut le gain en [%/V] de ce PWM ?

### 3.3.3 Simulation

Simulez votre circuit avec un générateur  $V_{sin}$  tel que  $V_{off} = 7.5V$ ,  $V_{amp1} = 0V$ ,  $freq = 100Hz$ . Puis :

1. Choisissez  $V_{amp1} = 0V$  et observez les tensions intéressantes ; mesurez la période d'oscillation et le rapport cyclique.
2. Choisissez  $V_{amp1} = 5V$  et observez les tensions sur une durée de 10 ms.
3. Avec le zoom et les curseurs, mesurez les périodes et rapports cycliques du PWM lorsque  $V_{ref} \simeq 2.5V$  et  $V_{ref} \simeq 12.5V$  ; sur la base de ces valeurs, que vaut le gain du PWM ?
4. Comparez aux valeurs précédentes et concluez.

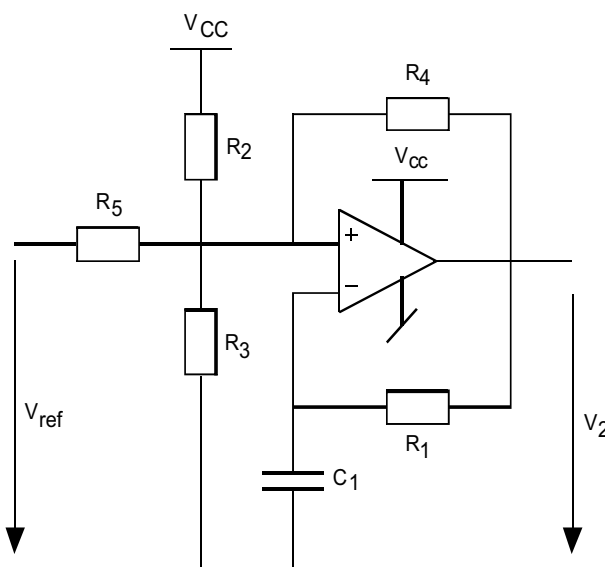


FIG. 3.2: Modulateur de largeur d'impulsions

### 3.3.4 Expérimentation

Câblez le circuit. Puis :

1. Relevez les graphes-écrans des tensions  $u_2(t)$  et  $u_{C1}(t)$ .
2. Comme les résultats sont assez sensibles aux tensions de saturation, mesurez-les au préalable et prenez-les en compte dans le fichier Matlab.
3. Mesurez les périodes et rapports cycliques pour une dizaine de valeurs de  $V_{ref}$ . Que se passe-t-il si  $V_{ref} = 0V$  ou  $V_{CC}$  ?
4. Portez ces résultats sur les graphes théoriques. Quel est le gain en [%/V] de votre PWM ?
5. Comparez avec les valeurs théoriques et concluez.

## 3.4 Analyse des résultats

N'oubliez pas de comparer et critiquer les résultats simulés et expérimentaux.

**Durée** 2 séances

### Référence

National Semiconductor : Application Note AN-74

```

% calcul d'un circuit PWM
clear all; close all; clc;
format compact; format short g;

% circuit
VCC = 15; VH = VCC-1.5; VL = 0.5;
R5 = 15e3; R2 = 150e3; R3 = 150e3; R4 = 150e3;
R234 = (1/R2+1/R3+1/R4)^-1;
R534 = (1/R5+1/R3+1/R4)^-1;
R523 = (1/R5+1/R2+1/R3)^-1;

% seuils de commutation pour U1 = Vin = VCC/2
Vin = VCC/2;
VT1 = ....
VT2 = ....

% calcul et choix de R1 et C1
f0 = 10e3; T0 = 1/f0;
tau = T0 / log((VT1-VL)/(VT2-VL) * (VH-VT2)/(VH-VT1));
C1 = 10e-9, R1 = tau / C1
R1 = ....., tau = R1*C1

% seuils de commutation pour Vin variable
Vin = 1 :VCC/100 :VCC-1;
VT1 = ....;
VT2 = ....;
figure;
plot(Vin, VT1, Vin, VT2); grid on;
title('...');
xlabel('...'); ylabel('...');

% période et rapport cyclique
tH = ....;
tL = ....;
periode = tL+tH;
rc = tH ./ periode;

% graphes
figure;
subplot (2,1,1);
plot (Vin, periode); grid on;
title('...');
xlabel('...'); ylabel('...');
axis([0 Vcc 0 0.3e-3]);
subplot (2,1,2);
plot (Vin, 100*rc); grid on;
xlabel('...'); ylabel('...');
axis([0 VCC 0 100]);

```

FIG. 3.3: Calcul du PWM avec Matlab

### 3 Quelques circuits avec comparateurs

# 4 Générateurs de signaux

**Objectifs** Comprendre le principe des générateurs de signaux et découvrir l'analyse spectrale.

## 4.1 Introduction

Les générateurs de signaux fournissent le plus souvent des signaux carrés, triangulaires, sinusoïdaux et rectangulaires. Ils utilisent pour cela deux comparateurs, un intégrateur et un circuit non-linéaire transformant le signal triangulaire en un signal sinusoïdal.

## 4.2 Analyse et simulation

### 4.2.1 Signaux carrés et triangulaires

Le générateur élémentaire que vous réaliserez est constitué d'un intégrateur et d'un comparateur (voir le cours) alimentés avec  $V_{CC} = \pm 15 [V]$ .

1. Rappelez le schéma et les équations associées à ce circuit.
2. Calculez la valeur des composants permettant d'obtenir un signal triangulaire de fréquence  $f_0 = 1 [kHz]$  et d'amplitude  $\hat{U}_{tr} \simeq 10 [V]$ . Pour les calculs, considérez des tensions de saturation symétriques égales à  $\pm (V_{CC} - 1 [V])$ .
3. Choisissez des valeurs normalisées pour les composants ; recalculez l'amplitude et la fréquence du signal triangulaire.
4. Simulez votre circuit, mesurez les tensions et fréquences ; comparez aux valeurs théoriques et concluez.

### 4.2.2 Signal sinusoïdal

En plus des signaux carrés et triangulaires ci-dessus, on souhaite générer un signal sinusoïdal.

1. Quel circuit devez-vous ajouter au schéma précédent pour y parvenir ? rappelez la démarche et les équations associées.
2. Simulez votre circuit et observez le signal de sortie.

## 4 Générateurs de signaux

3. D'un point de vue purement visuel, quelle est la qualité de votre sinusoïde ? est-elle symétrique ? quelle est son amplitude ? sa composante continue ?
4. Quels sont les éléments du circuit sur lesquels vous pensez pouvoir agir pour l'améliorer ?
5. Proposez un schéma permettant d'obtenir un signal sinusoïdal d'amplitude variable avec ajustage de la composante DC (il n'est pas nécessaire de le réaliser).

### 4.2.3 Impulsions rectangulaires

Si vous avez ou prenez le temps :

1. Imaginez un circuit permettant, à partir du signal triangulaire de votre générateur, de réaliser un signal rectangulaire à rapport cyclique variable.
2. Dessinez le comportement temporel des tensions.
3. Calculez les composants du circuit pour avoir un rapport cyclique du signal rectangulaire de 20%.
4. Vérifiez votre analyse avec Spice.

### 4.2.4 Analyse spectrale

L'analyse de la qualité d'une sinusoïde réelle ne peut pas se faire visuellement. Un moyen simple et efficace consiste à observer son spectre d'amplitudes et d'en calculer le taux de distorsion harmonique (TDH).

Connaissant l'amplitude  $A_k$  de chaque harmonique d'ordre  $k$ , celui-ci se calcule comme suit :

$$TDH \equiv \frac{X_{eff, k>1}}{X_{eff, k=1}} = \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots}{A_1^2}}$$

Dans le domaine spectral, comment est représentée une sinusoïde parfaite ? Idem pour un signal périodique quelconque ?

Nous verrons dans le cours de Signaux et Systèmes, qu'une analyse de Fourier par FFT (Fast Fourier Transform) n'est correcte que si le signal périodique est permanent et si la durée observée contient un nombre entier de périodes du signal.

Afin de ne pas avoir à se préoccuper de cela, on atténue les effets de bords en multipliant le signal original par la fonction de Hann

$$g(t) = \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \left( 2\pi \frac{t}{t_{max}} \right) \right)$$

Dans Probe, cela revient à tracer la fonction suivante :

$$V(out)/2*(1-\cos(2*\pi*time/tmax))$$

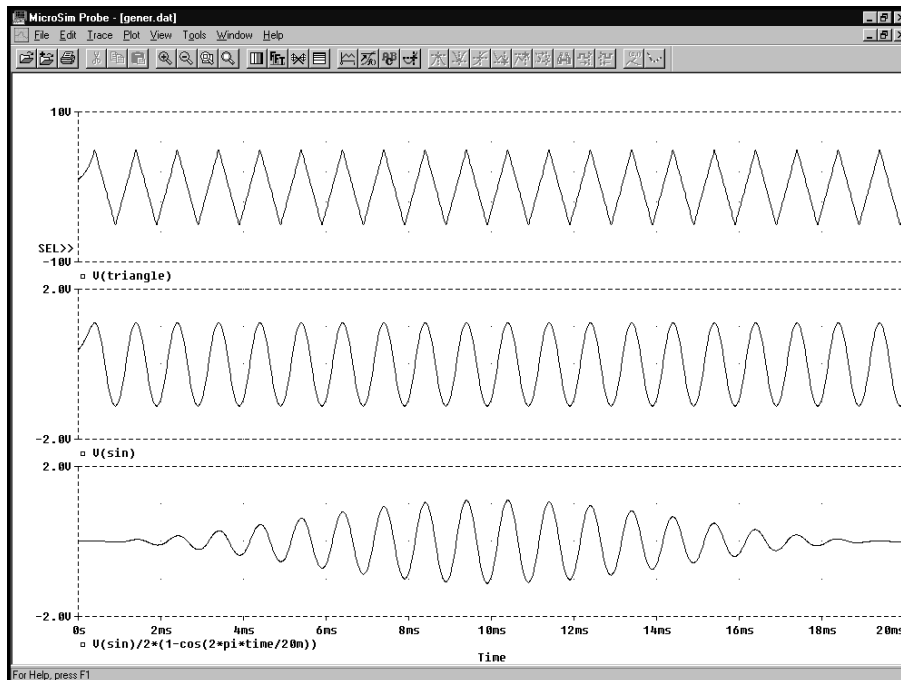


FIG. 4.1: Signaux temporels

où  $t_{\max}$  est choisi égal à la durée d'analyse (figure 4.1).

Lors de l'analyse spectrale de vos signaux, veillez à simuler une réponse temporelle contenant au moins une dizaine de périodes avec suffisamment de points.

Dans Probe, utilisez l'option Fourier du menu Probe/Trace/Fourier ou le bouton FFT. En abscisse, limitez le domaine analysé à une dizaine de composantes spectrales et choisissez une échelle linéaire. Pour l'ordonnée, prenez une échelle logarithmique (figure 4.2).

Pour votre signal, quels sont les harmoniques significatifs? A l'aide du curseur, relevez l'amplitude des harmoniques 1 à 10. Calculez le TDH de votre signal.

## 4.3 Mesures

### 4.3.1 Signaux temporels

Câblez votre circuit avec des composants précis à 1%, mesurez la fréquence et les amplitudes des signaux carrés, triangulaires et sinusoïdaux; comparez aux valeurs théoriques et concluez.

### 4.3.2 Analyse spectrale

L'analyse spectrale faite avec Spice peut également se faire en laboratoire à l'aide de l'oscilloscope Tektronix TDS2012.

## 4 Générateurs de signaux

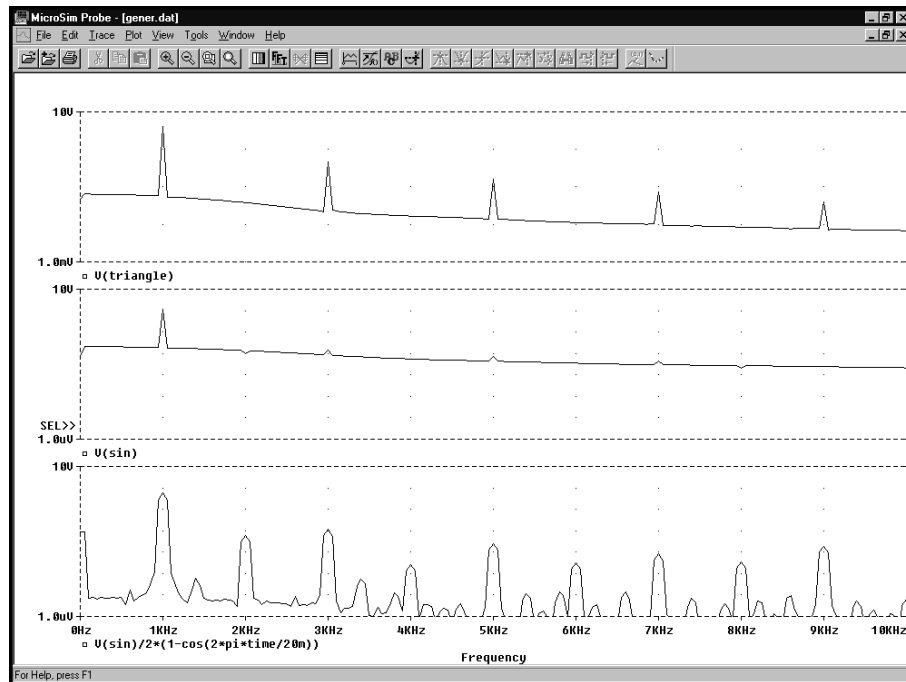


FIG. 4.2: Signaux fréquentiels

**Utilisation de l'analyseur spectral** Dans une première approche, familiarisez-vous avec l'analyseur spectral. Pour cela,

1. appliquez à CH1 un signal carré provenant du générateur Siemens ; réglez son amplitude pic-pic à  $2V_{pp}$  et sa fréquence à  $1\text{ kHz}$  ; quelles seront les fréquences des composantes spectrales apparentes ?
2. sélectionnez le menu  
Math /Opération FFT /Source CH1 /Fenêtre (à essayer et choisir)  
/FFT\_zoom x5
3. choisissez les sensibilités 10dB/div et 2.5 kHz/div ;
4. avec le curseur, mesurez les amplitudes ( $A_{k,dB}$ ) des composantes spectrales entre 0 et 25 kHz ; portez ces valeurs dans un fichier Matlab et calculez les amplitudes  $A_k$  ;
5. vérifiez que la décroissance des composantes spectrales  $A_k$  se fait en  $1/k$  comme le prévoit l'analyse de Fourier pour un signal carré.

**Mesure du TDH du générateur Siemens** On souhaite ici mesurer la qualité du signal sinusoïdal fourni par le générateur Siemens. Pour cela,

1. appliquez à CH1 un signal sinusoïdal d'amplitude pic-pic  $2V_{pp}$  et de fréquence  $1\text{ kHz}$  ;
2. passez en mode FFT ; fixez les sensibilités à 10dB/div et 500Hz/div ; choisissez la fenêtre qui vous permet de mieux distinguer les composantes spectrales ;



3. mesurez les fréquences et amplitudes ( $A_{k,dB}$ ) des composantes spectrales significatives entre 0 et 5 kHz ;
4. portez ces valeurs dans un fichier Matlab ; calculez les amplitudes  $A_k$  et le TDH du générateur de signaux.

**Mesure du TDH de votre signal sinusoïdal** Répétez les points ci-dessus avec votre signal sinusoïdal. Quel est son taux de distorsion ? Qu'en pensez-vous ? Concluez.

## 4.4 Analyse des résultats

Analysez, comparez et commentez les résultats obtenus.

**Durée** 2 séances

## 4 Générateurs de signaux

# 5 Oscillateurs (VCO et Wien)

**Objectifs** Étudier et réaliser un oscillateur non linéaire commandé en tension (VCO) et un oscillateur quasi linéaire (oscillateur de Wien).

## 5.1 Circuit VCO unipolaire

Le principe d'un oscillateur commandé en tension (Voltage Controlled Oscillator) est basé sur le générateur de signaux rectangulaires et triangulaires comportant un comparateur et un intégrateur auquel on applique une tension d'entrée positive ou négative suivant l'état du comparateur. Le circuit proposé ci-dessous possède l'avantage, par rapport à celui étudié au cours, d'être unipolaire et de ne nécessiter que deux AO et un transistor.

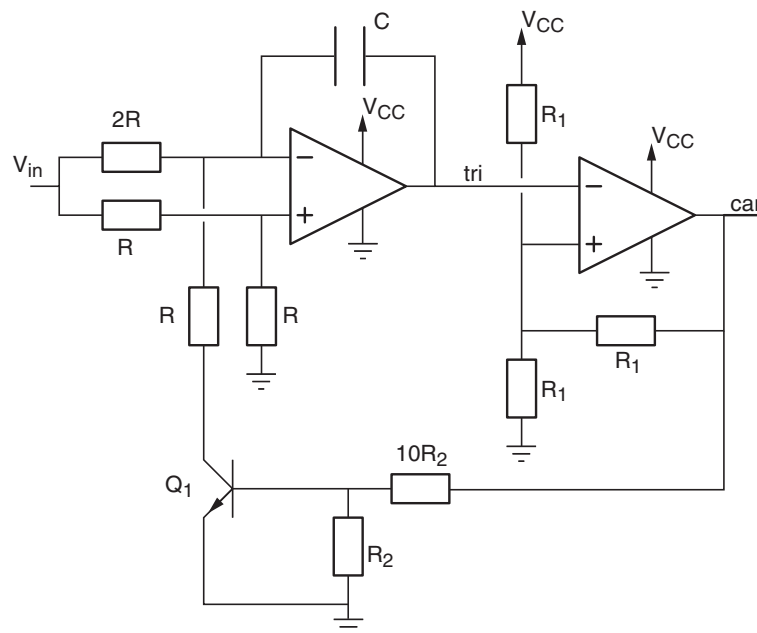


FIG. 5.1: VCO unipolaire

### 5.1.1 Étude théorique

1. Montrez que, suivant l'état du commutateur, le courant circulant dans la capacité  $C$  vaut

$$I_c = \pm \frac{V_{in}}{4R}$$

## 5 Oscillateurs (VCO et Wien)

Si  $V_{in} = cte$ , que vaut la tension de sortie de l'intégrateur ?

- Montrez que, si  $V_H = V_{CC}$  et  $V_L = 0$ , les seuils de commutation valent

$$V_{T1} = \frac{1}{3}V_{CC} \quad V_{T2} = \frac{2}{3}V_{CC}$$

- Dans le cas où  $V_H \neq V_{CC}$  et  $V_L > 0$ , que valent les seuils de commutation, l'amplitude du signal triangulaire et la fréquence du VCO.
- Admettant  $V_{in} = +5 [V]$ ,  $V_{CC} = 15 [V]$ ,  $V_H = 14 V$  et  $V_L = 1 V$ , calculez la valeur des composants pour que  $f = 5 [kHz]$ ; en particulier, veillez à ce que les résistances  $R$  et  $R_1$  soient comprises entre  $10 k\Omega$  et  $1 M\Omega$ . Prenez  $R_2 \simeq R/3$  (pourquoi ?).
- Choisissez des valeurs normalisées pour vos composants; puis recalculez l'amplitude du signal triangulaire et la fréquence pour  $V_{in} = 5 [V]$ .
- Que vaudra le gain du VCO en  $[kHz / V]$  ?

### 5.1.2 Simulation

Simulez le circuit avec les valeurs normalisées des composants. Puis :

- Mesurez les niveaux de saturation du comparateur et ses tensions de seuil.
- Relevez la fréquence du VCO lorsque  $V_{in} = 5 [V]$ .
- Comparez ces résultats aux valeurs théoriques; justifiez les différences.
- Appliquez  $V_{in}(t) = 4 + 2 \sin(2\pi f_0 t) [V]$  avec  $f_0 = 100 [Hz]$  et observez les signaux du VCO.

### 5.1.3 Réalisation et mesures

Construisez votre circuit avec un transistor bipolaire 2N2222 de préférence au PN100 qui est moins rapide. N'oubliez pas les condensateurs de découplage. Puis :

- Appliquez  $V_{in} = 5 [V]$ . Mesurez les valeurs  $V_H$  et  $V_L$  du signal carré ainsi que l'amplitude du signal triangulaire. Mesurez la fréquence de votre VCO.
- Relevez la caractéristique de transfert  $f(V_{in})$  de votre VCO avec  $V_{in} = 0, 1, 2, \dots, 20 [V]$ . Portez ces points sur un graphe Matlab et déterminez le gain de votre VCO avec `polyfit`. Que valent  $f_{min}$  et  $f_{max}$ ? Quelles sont les limites du domaine linéaire ?
- Appliquez différents signaux d'entrée (carré, sinusoïdal, triangulaire) de fréquence  $f_0 \simeq 100 [Hz]$ , d'amplitude  $A \simeq 2 [V]$  superposés à une tension continue  $V_{dc} \simeq 4 [V]$ . Observez et relevez les graphes intéressants.

### 5.1.4 Analyse des résultats

Analysez et critiquez vos résultats théoriques, simulés et expérimentaux après les avoir portés dans un tableau comparatif. Concluez.

## 5.2 Oscillateur de Wien

L'oscillateur de Wien est un des oscillateurs linéaires les plus utilisés. Il est constitué d'un amplificateur non-inverseur auquel on applique une réaction à l'aide d'un filtre passe-bande réalisé avec une cellule de Wien (figure 5.2).

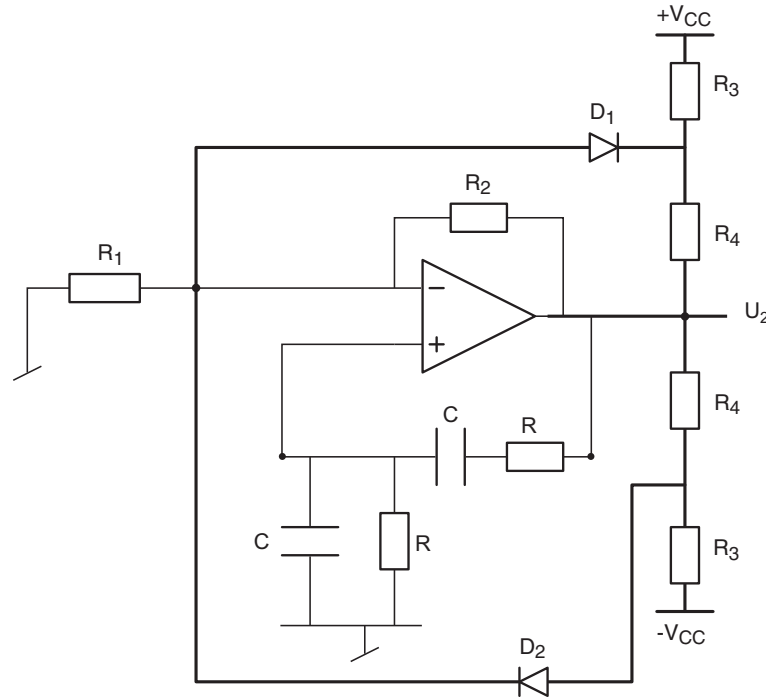


FIG. 5.2: Schéma de l'oscillateur de Wien (trait léger) avec contrôle d'amplitude (trait gras)

### 5.2.1 Analyse du circuit

1. Afin de faciliter votre analyse, redessinez le schéma de l'oscillateur de Wien sans la partie contrôle d'amplitude. Identifiez les parties correspondant à  $A$  et  $\beta$  du schéma de base de la CR.
2. Remarquez que l'oscillateur de Wien est un circuit à réaction positive. Que vaut alors sa fonction de transfert en boucle fermée ? À partir de son schéma calculez ce que valent  $A$  et  $\beta$ .
3. Calculez la condition d'oscillation et tirez-en le gain  $A_0$  et la pulsation d'oscillation  $\omega_0$ .
4. Prenant en compte la partie du circuit qui sert au contrôle de l'amplitude, montrez que le gain du circuit vaut

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \equiv A_1 \quad \text{pour les faibles amplitudes}$$

$$A = 1 + \frac{R_{24}}{R_{13}} \equiv A_2 \quad \text{pour les fortes amplitudes}$$

## 5 Oscillateurs (VCO et Wien)

Afin que le circuit puisse démarrer par lui-même avec une faible amplitude et, de manière à éviter que l'amplitude ne croisse indéfiniment, on prendra  $A_2 < A_0 < A_1$ .

5. Considérant que l'on veut obtenir un signal sinusoïdal d'amplitude 6 V et de fréquence 1 kHz avec un oscillateur alimenté en  $\pm 15$  V, recherchez la valeur de ses composants en utilisant les graphes de la figure 5.3. Adoptez des valeurs normalisées.
6. À partir de ces valeurs, calculez les gains  $A_1$  et  $A_2$  ainsi que le point de cassure de la courbe de gain

$$U_B = \frac{V_j + V_{CC} \frac{R_4}{R_3 + R_4}}{\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

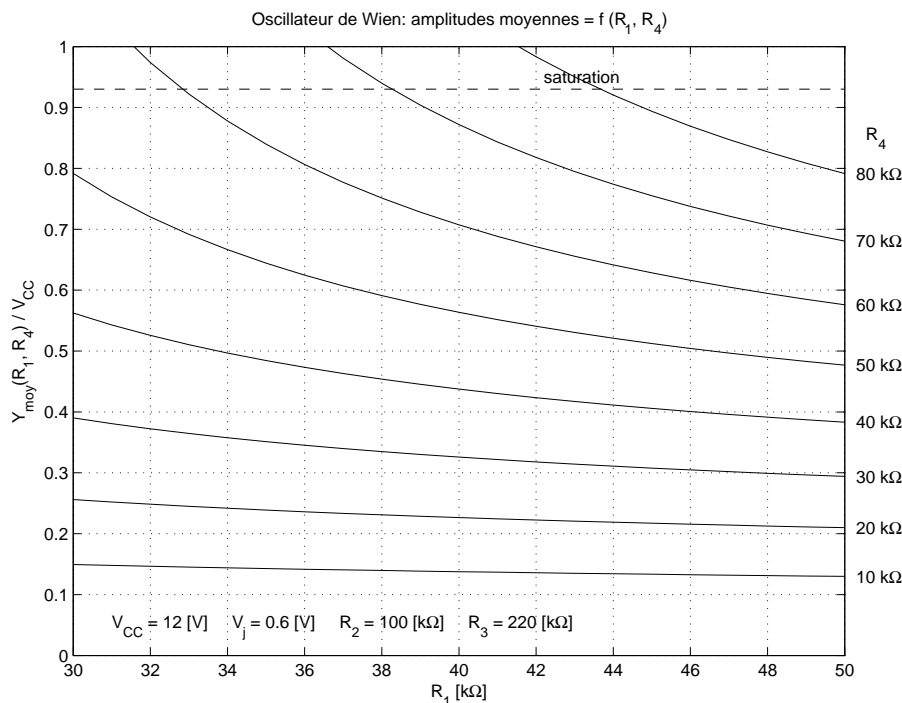


FIG. 5.3: Amplitudes moyennes d'un oscillateur de Wien

### 5.2.2 Simulation

Dessinez le circuit avec les valeurs normalisées des composants. Puis :

1. Placez une tension initiale de 1mV sur une capacité et lancez la simulation sur une durée de 25ms. Observez et expliquez.
2. Placez une tension initiale de 1V sur une capacité et lancez la simulation sur une durée de 25ms. Mesurez l'amplitude et la fréquence de l'oscillation.
3. Mesurez le TDH du signal de sortie. Quelles précautions prenez-vous pour que cette mesure soit satisfaisante ?

### 5.2.3 Réalisation et mesures

Câblez votre circuit. Mesurez l'amplitude et la fréquence de votre signal. Faites son analyse spectrale ; quelle fenêtre d'observation choisissez-vous ? Mesurez le TDH du signal de sortie.

### 5.2.4 Analyse des résultats

Analysez et critiquez vos résultats théoriques, simulés et expérimentaux après les avoir portés dans un tableau comparatif. Concluez.

**Durée** 2 séances