
Avertisseur sonore de marche arrière

Annexe du guide étudiant

S1- APP1

Automne 2022 – Semaines 1, 2 et 3

Département de génie électrique et de génie informatique et de génie
robotique

Faculté de génie

Université de Sherbrooke

Note : En vue d’alléger le texte, le masculin est utilisé pour désigner les femmes et les hommes.

Document S1_APP1_AvertisseurSonore_Guide_Etudiant.docx

Rédigé par Réjean Fontaine, ing., août 2012

Mis à jour par Jean-Philippe Gouin, Alexandre Tessier et Maxime Dubois, août 2016

Mis à jour par Jean-Philippe Gouin, Claudette Légaré et Charles Richard, août 2017

Mis à jour par Réjean Fontaine, Alexandre Tessier et Claudette Légaré, août 2018

Mis à jour par Claudette Légaré, David Pivin, Jean-Philippe Gouin et Jonathan Vincent, août 2019

Mis à jour par Jean-Samuel Lauzon, Vincent-Philippe Rhéaume et Jean-Philippe Gouin, août 2020

Mis à jour par Serge Apedovi Kodjo , Vincent-Philippe Rhéaume et Jean-Philippe Gouin, août 2021

Mis à jour par Sylvain Nicolay, Mathieu Massicotte et Jean-Philippe Gouin, août 2022

Copyright © 2022 Département de génie électrique et de génie informatique. Université de Sherbrooke.

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	Terminologie et composants de l'avertisseur sonore de marche arrière	2
2.1.	La nomenclature des pièces.....	2
2.2.	Les résistances.....	5
2.3.	Les condensateurs.....	9
2.4.	La diode	11
2.5.	Le cavalier.....	11
2.6.	Le potentiomètre	12
2.7.	La diode Zener.....	13
2.8.	La diode électroluminescente	14
2.9.	Les alimentations	14
2.10.	Les circuits intégrés.....	15
2.11.	L'amplificateur opérationnel.....	17
2.12.	Le 555.....	17
2.12.1.	Mode astable.....	18
2.12.2.	Mode monostable	20
2.12.3.	Le générateur d'ondes carrées haute fréquence	20
2.12.4.	Générateur d'ondes carrées basse fréquence	21
2.13.	Amplificateur avec gain unitaire	22
2.14.	Intégrateur	22
2.15.	Filtre passe-bas	23
2.16.	Interrupteur analogique.....	23
2.17.	Amplificateur audio LM386.....	23
2.18.	Connecteur J3, interrupteur S1 et le haut-parleur	24
2.19.	Les composants non branchés	24
2.20.	Le circuit imprimé	24
3.	La liste de matériel ou BOM	26
4.	Évaluation théorique et pratique de la puissance consommée	28
4.1.	Puissance moyenne consommée avec une excitation continue	28
4.1.1.	Puissance moyenne consommée par les résistances, condensateurs et inductances	28
4.1.2.	Puissance moyenne coNsommée par les composants complexes	28

4.2.	Puissance moyenne consommée avec une excitation non continue	30
4.2.1.	Puissance dynamique consommée par les résistances, condensateurs et inductances	30
4.2.2.	Puissance moyenne consommée par les composants complexes	32
4.3.	Puissance totale consommée d'un circuit ou d'un sous-circuit.....	32
4.4.	Mesure pour évaluer la puissance consommée	33
5.	Les fonctions transcendantes	35
6.	Le plan de Validation de conception et le plan de test	36
6.1.	Le plan de validation de conception	36
6.2.	Plan de test vs plan de validation de conception.....	36
7.	Références	40

Liste des figures

FIGURE 1. SCHEMA-BLOC DU CIRCUIT AVERTISSEUR SONORE DE MARCHE ARRIERE.	3
FIGURE 2. SCHEMA ELECTRIQUE DU CIRCUIT AVERTISSEUR SONORE DE MARCHE ARRIERE.	4
FIGURE 3. RESISTANCE DE MONTAGE EN SURFACE.	5
FIGURE 4. RESISTANCE AXIALE.	5
FIGURE 5. RESISTANCE AVEC CODE DE COULEUR.	5
FIGURE 6. CONDENSATEUR CERAMIQUE NE NECESSITANT AUCUNE POLARISATION. IL PEUT ETRE BRANCHE DANS N'IMPORTE QUEL SENS.	10
FIGURE 7. CONDENSATEUR ELECTROLYTIQUE NECESSITANT D'ETRE POLARISE : LA PATTE LA PLUS COURTE EST LA BORNE (-).	10
FIGURE 8. À GAUCHE, UN CAVALIER, A DROITE, LE CAVALIER EST PLACE SUR 2 BROCHES POUR FAIRE UN COURT-CIRCUIT.	12
FIGURE 9. SCHEMA EQUIVALENT DU POTENTIOMETRE SELON 2 MODES DE BRANCHEMENT.	12
FIGURE 10. CARACTERISTIQUE IDEALE DE LA DIODE ZENER.	13
FIGURE 11. EXEMPLE D'UN CIRCUIT GENERANT UNE TENSION RELATIVEMENT FIXE SI LA DIODE EST SUFFISAMMENT POLARISEE.	13
FIGURE 12. DEUX SOURCES FLOTTANTES MISES EN SERIE PEUVENT CREER UNE TENSION DE +9 V ET DE -9 V.	15
FIGURE 13. BOITIER DE TYPE DIP.	16
FIGURE 14. BOITIER DE TYPE SMT.	16
FIGURE 15. NUMEROTATION DE CIRCUITS INTEGRES.	16
FIGURE 16. LE CONNECTEUR TAMPON (OU SOCKET) (GAUCHE) EST SOUDE SUR LE CIRCUIT IMPRIME ET SERT DE RECEPTACLE AU CIRCUIT INTEGRE (DROITE).	17
FIGURE 17. SCHEMA INTERNE DU 555 ¹⁴	18
FIGURE 18. MONTAGE EN CIRCUIT ASTABLE ¹⁵	19
FIGURE 19. SORTIE DU 555 (TRACE DU HAUT) ET CHARGE ET DECHARGE D'UN RESEAU R-C (TRACE DU BAS).	20
FIGURE 20. ÉQUATIONS DE LA FICHE TECHNIQUE DU LM555 ²	22
FIGURE 21. LE CIRCUIT IMPRIME.	25
FIGURE 22. FIGURE 5 TIREE DE LA SPECIFICATION TECHNIQUE LM555 ³	31
FIGURE 23 : SIGNAUX REELS DE DIFFERENCE DE POTENTIEL DANS UNE RESISTANCE DU CIRCUIT DE L'APP.	32
FIGURE 24. EXEMPLE D'UNE RESOLUTION PAR UNE METHODE GRAPHIQUE.	35

Liste des tableaux

TABEAU 1. ASSIGNATION DES COULEURS A UN NOMBRE.	6
TABEAU 2. DEFINITION DE LA PRECISION EN FONCTION DE LA COULEUR DE LA DERNIERE BANDE.	7
TABEAU 3. LISTE DE MATERIEL DE LA PROBLEMATIQUE DE L'APP1 A COMPLETER.	26
TABEAU 4. EXEMPLE DE PLAN DE TEST.	38
TABEAU 5. EXEMPLE DE PLAN DE VALIDATION.	39

1. INTRODUCTION

Le circuit d'avertisseur sonore de marche arrière sur lequel vous allez travailler est relativement complexe de prime abord, mais ne vous laissez pas décourager. Vous verrez qu'il est séparé en plusieurs modules qui, pris indépendamment l'un de l'autre, sont relativement simples à comprendre. Cet APP vous permettra de faire un cheminement très rapide vers des techniques de conception simples d'une part; et d'autre part, vers des techniques d'assemblage et de déverminage de circuits électroniques. Cet annexe au guide étudiant a pour but de rassembler certaines informations complémentaires à votre formation qui sont plus spécifiques à la problématique. Dans un premier temps, cet annexe s'attardera au circuit électronique de l'avertisseur sonore de marche arrière et aux spécifications techniques demandées comme telles et dans un deuxième temps, à plusieurs informations complémentaires pour vous permettre de faire le montage de votre circuit.

Tel que présenté dans la problématique, l'avertisseur sonore de marche arrière comporte plusieurs étages de façonnage d'ondes jusqu'à obtenir une sinusoïde cadencée par une onde carrée qui alimente un haut-parleur. La Figure 1 représente, sous forme d'un schéma-bloc, cette information et indique quelles sont les performances **attendues du client** du circuit à chacune des étapes. Par exemple, à la sortie du générateur d'ondes carrées haute fréquence appelé *Oscillateur haute fréquence* sur le schéma-bloc, le signal analogique devrait être à environ 1 kHz + 0 % et – 10 % avec une amplitude de 5 V \pm 10 % lorsqu'il est alimenté à \pm 9 V \pm 10%. Les marges sont importantes et vous devrez vous y attarder pour le plan de validation de la conception. Par exemple, la fréquence ne doit pas dépasser 1 kHz, car il vous sera difficile d'atteindre les performances des étages subséquentes au niveau des amplitudes. Vous pourrez tester les performances de chacun des étages au fur et à mesure de la conception/assemblage de votre circuit grâce à l'utilisation de l'oscilloscope qui deviendra vos yeux pour comprendre ce qui ne va pas bien dans votre circuit. Les signaux observés sur l'oscilloscope devraient ressembler aux signaux dessinés de la Figure 1. Vous remarquerez rapidement que la nomenclature des signaux peut être exprimée sous différentes formes : $V_{\text{crête}}$, $V_{\text{crête-crête}}$, V_{rms} . Il est important de démêler ces formulations et devenir habile à passer de l'une à l'autre. Les lectures dans le volume recommandé dans le guide étudiant [1] couvrent cet aspect.

2. TERMINOLOGIE ET COMPOSANTS DE L'AVERTISSEUR SONORE DE MARCHE ARRIÈRE

Certaines terminologies utilisées au niveau électronique n'ont pas de signification pour vous pour l'instant. Ce n'est pas grave; nous ne nous attendons pas à ce que vous compreniez ce qui se passe dans les signaux au niveau fréquentiel; ce sont des notions qui seront abordées en S2. Les objectifs de l'APP1, sur lesquels vous devriez vous concentrer, sont d'être en mesure de lire un schéma simple, comprendre des fiches techniques et d'en faire un circuit fonctionnel. Ainsi, même si vous voyez une fonction d'intégration, il est important de comprendre comment mathématiquement le changement de comportement peut être effectué et de le voir visuellement sur un oscilloscope, mais pas comment le circuit électronique fonctionne. Il en est de même avec le filtre passe-bas. Cependant, certaines notions sont plus faciles à comprendre dont l'amplification d'un signal où la sortie est une copie du signal en entrée, mais avec une amplitude modifiée.

Plongeons maintenant plus en profondeur dans le circuit de l'avertisseur sonore de marche arrière. Pour cela, vous devrez avoir côte à côte les Figure 1 et Figure 2. Vous allez également devoir vous référer à plusieurs fiches techniques en parallèle. Ne vous découragez pas, une fois que vous aurez passé au travers, ce sera facile de revenir en arrière.

2.1. LA NOMENCLATURE DES PIÈCES

Sur la Figure 2, vous remarquerez que chaque composant comporte un numéro de référence par exemple, P1 (en haut à gauche), D1, C1, C2 ou encore U1. Ces références, appelées en anglais *reference designator*, sont utilisées pour identifier chacun des composants afin de pouvoir les retrouver autant dans le schéma que sur le circuit imprimé. Le numéro de la référence indique son ordre d'apparition dans le schéma. Ainsi, D1 a été inséré dans le schéma avant D2 qui lui a été inséré dans le schéma avant D3, etc. Le numéro ne nous intéresse pas réellement, le seul point important est qu'ils soient tous différents et uniques. Il est là pour localiser le composant parmi les autres composants du même type. Cependant, la lettre en préfixe est importante, car elle indique le type de composants. Voici une brève liste de ces lettres ainsi que leur correspondance :

P : connecteur

D : diode

C : condensateur

R : résistance ou potentiomètre

L : inductance ou ferrite

U : circuit intégré

J : cavalier ou *jumper*

TP : point de test ou *test point*

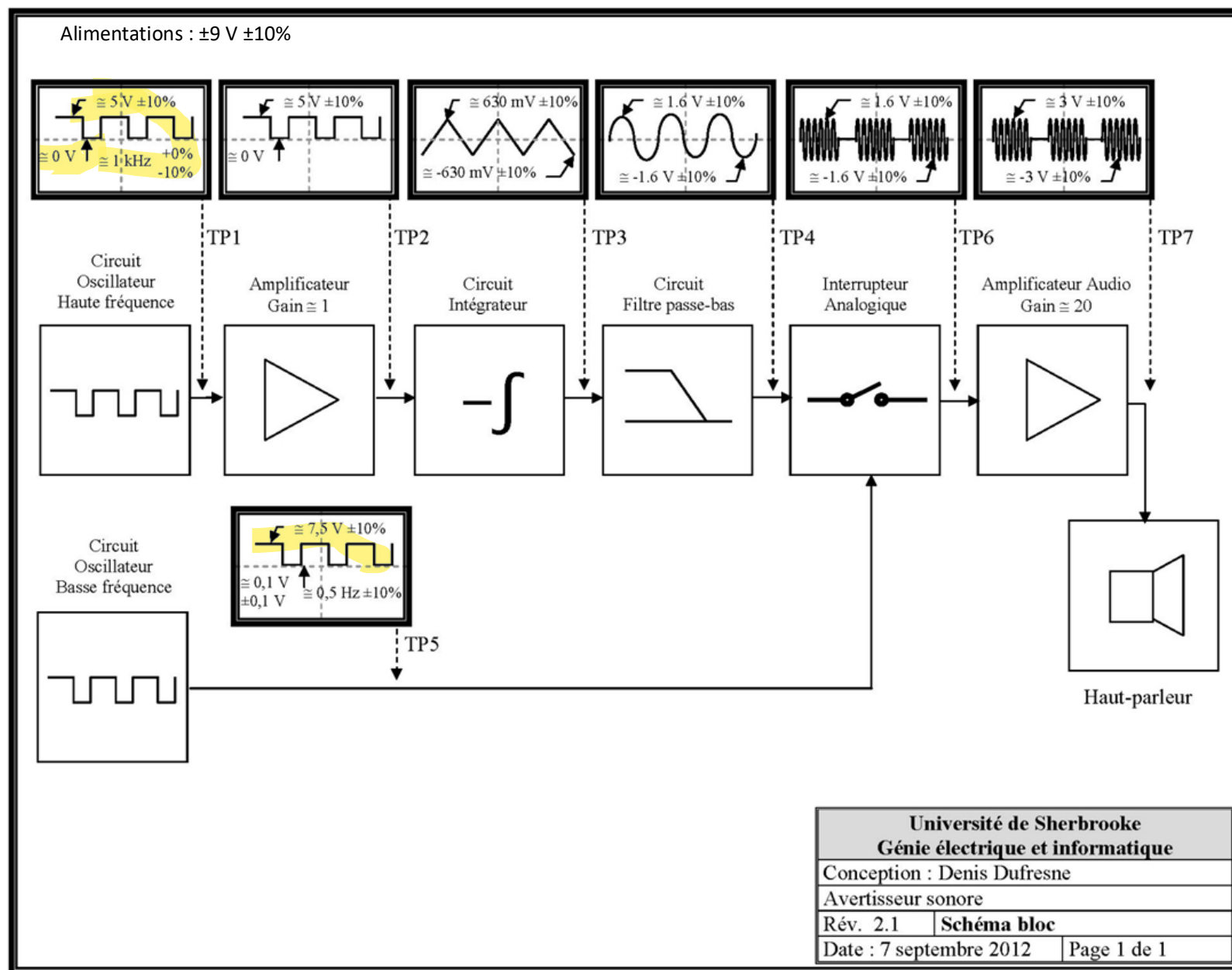


Figure 1. Schéma-bloc du circuit avertisseur sonore de marche arrière.

2.2. LES RÉSISTANCES

Sur le schéma, vous remarquez plusieurs résistances (nommée R_i). La résistance compte parmi les composants les plus utilisés en génie électrique. Elle existe sous plusieurs boîtiers et bien que le boîtier le plus commun soit la résistance de montage en surface (Figure 3), bien adapté au montage de circuits imprimés de masse, le boîtier le plus utilisé pour le prototypage est la résistance axiale (Figure 4) sur laquelle une série de bandes de couleurs code sa valeur.



Figure 3. Résistance de montage en surface².



© Can Stock Photo

Figure 4. Résistance axiale³.

Le nombre de bandes est important, car il reflète la précision du composant. Le plus commun est le codage sur 4 bandes (Figure 5) décrit :

Bande 1 : premier chiffre significatif

Bande 2 : second chiffre significatif

Bande 3 : multiplicateur

Bande 4 : précision de la résistance.

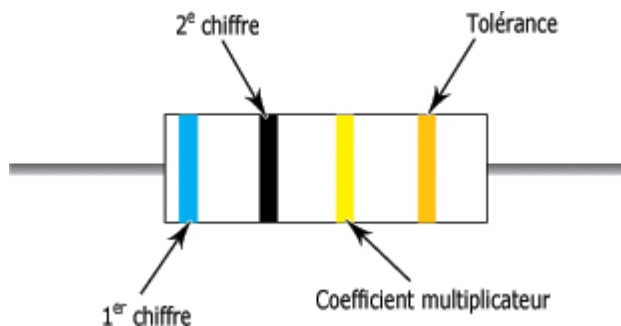


Figure 5. Résistance avec code de couleur⁴.

Les différentes couleurs des bandes sont attribuées à différents chiffres. Pour les premières bandes, le code suit le Tableau 1.

Tableau 1. Assignment des couleurs à un nombre.

Noir		0
Brun		1
Rouge		2
Orange		3
Jaune		4
Vert		5
Bleu		6
Violet		7
Gris		8
Blanc		9











Les scientifiques aguerris parmi vous retiendront que ce code de couleur n'est rien d'autre que le spectre de l'arc-en-ciel en partant du rouge jusqu'au violet. Le spectre est pris entre le noir et le blanc (qui sont les plus éloignés) et le brun et le gris plus au centre. Pour les autres étudiants plus pragmatiques, certaines comptines du genre « Notre BRasserie est Ouverte Jeudi et Vendredi, BienVenue Grand Buveurs » ou « Ne Brulez Rien Ou Je Vais Bruler Vos Gant Blanc » sont plus faciles à retenir. Pour un codage sur 4 bandes, les 2 premières indiquent la valeur de la résistance alors que la troisième est son facteur multiplicatif.

Pour leur part, les facteurs multiplicatifs sont décrits dans le Tableau 2.

Noir		1 ou 10^0
Brun		10 ou 10^1
Rouge		100 ou 10^2
Orange		1k ou 10^3
Jaune		10k ou 10^4
Vert		100k ou 10^5
Bleu		1M ou 10^6
Violet		10M ou 10^7
Gris		100M ou 10^8
Blanc		1G ou 10^9
Or		0,1 ou 10^{-1}
Argent		0,01 ou 10^{-2}

Le code de couleur de la dernière bande définit la précision tel que présenté dans le Tableau 2.

Tableau 2. Définition de la précision en fonction de la couleur de la dernière bande.

Brun		1 %
Rouge		2 %
Orange		3 %
Jaune		4 %
Vert		0,5 %
Bleu		0,25 %
Violet		0,1 %
Gris		0,05 %
Argent		10 %
Or		5 %

Par exemple une résistance avec les 4 bandes :

brun, noir, rouge, or sera de valeur $10 \times 10^2 = 1 \text{ k}\Omega \pm 5 \%$

Pour un codage sur 5 bandes, les 3 premières bandes indiquent la valeur de la résistance alors que la quatrième est son facteur multiplicatif et la 5^e bandesa précision.

Par exemple une résistance avec les 5 bandes :

orange, orange, rouge, bleu et brun sera de valeur $332 \times 10^6 = 332 \text{ M}\Omega \pm 1 \%$

Les résistances possèdent une certaine précision. Cette précision indique la plage dans laquelle la résistance pourrait être. Par exemple, une résistance de 345 ohms avec une précision de 5 % variera entre 327,75 Ω et 362,25 Ω .

Une résistance d'une meilleure précision se répercute directement sur son coût. Avec le temps, les ingénieurs ont développé des techniques pour utiliser principalement des résistances 10 %, 5 % et 1 %. Il est extrêmement rare d'avoir besoin de résistances avec des précisions inférieures à 1 %. L'art de la conception électronique est de faire des systèmes électroniques précis avec des composants imprécis. Vous découvrirez ces techniques dans les prochaines années.

Il arrive que l'ordre des bandes soit difficile à déterminer (surtout s'il n'y a pas de bande *or* ou *argent*). La bande la plus large indique généralement la 1^{ère} bande. Si les bandes ont la même largeur, la bande à l'écart des autres représente généralement la précision. Lorsque vous n'êtes pas certains d'une valeur, il faut se replier sur le multimètre.

Les résistances ne sont pas disponibles dans toutes les valeurs possibles. Autant pour la production que pour la distribution, ce serait impensable. Certains standards ont été adoptés, les valeurs disponibles ont été choisies en fonction de la précision de la résistance. Par exemple, 24 valeurs sont possibles pour la précision de 5 %.

E24 (±5%) : 100 - 110 - 120 - 130 - 150 - 160 - 180
200 - 220 - 240 - 270 - 300 - 330 - 360 - 390
430 - 470 - 510 - 560 - 620 - 680 - 750 - 820 - 910

Chaque valeur est disponible pour chaque puissance de 10 (i.e pour chaque couleur de la 3^e bande d'une résistance à 4 bandes).

La sélection d'une résistance comporte 4 éléments et ce sont ces 4 éléments que nous recherchons pour compléter un BOM :

RES 390K OHM 1/10W 5% 0805ⁱ.

- 390 kOhms est la valeur choisie pour réaliser une fonction précise en fonction d'équation ou de fiche technique. La valeur calculée de la résistance n'est habituellement pas disponible dans les résistances standards. Il faut en sélectionner une à partir du standard, mais pour cela, il faut estimer l'effet des variations potentielles des résistances sur la fonctionnalité du circuit sous conception. C'est ici que votre expertise peut devenir cruciale.
- 1/10 W indique la capacité de dissipation de chaleur du boîtier. Il faut s'assurer que la puissance dissipée soit inférieure à la capacité du boîtier. Nous y revenons plus loin dans ce document.
- 5% représente la précision de la résistance. Dans les circuits, nous allons nous assurer que cette variation ne viendra pas affecter le fonctionnement du circuit. Nous tentons, autant que possible, de choisir les résistances 5 %, car leur coût est moindre. Ainsi, tous les circuits de polarisation (exemple résistance de pull-up d'une diode Zener), seront réalisés avec une résistance 5 % où nous allons nous assurer que la valeur extrême de la précision du boîtier permettra encore de rencontrer les spécifications recherchées. Nous allons habituellement utiliser les résistances 1 % dans les circuits de filtrage où des facteurs de qualité sont élevés, ce qui n'est pas le cas de notre problématique.
- 0805 désigne le type de boîtier. Ce dernier est choisi à la fois pour des considérations techniques car il doit dissiper adéquatement la chaleur qu'il produit et des considérations pragmatiques liées aux pratiques de l'entreprise pour laquelle vous travaillez. Dans ce dernier cas, le choix du boîtier sera réalisé en fonction des technologies accessibles : il existe des composants traversant le circuit imprimé (*Through hole* en anglais), ou à montage en surface (*Surface mount technology* ou *SMT* en anglais). Les *through holes* dissipent plus facilement la chaleur alors que les boîtiers *SMT* sont mieux adaptés pour la miniaturisation. La section 4 vous expliquera comment évaluer la puissance dissipée. Cependant, il est possible de revenir à la planche à dessin et de réduire la puissance dissipée des résistances par une conception appropriée. Au niveau des boîtiers de montage en surface, il existe quelques standards de grosseurs, s'exprimant en fonction de leurs dimensions physiques. Un boîtier 0805 sera de 80 millièmes de pouce par 50 millièmes de pouce. Il est aussi possible d'exprimer le boîtier en format métrique : un boîtier impérial 0805 sera équivalent à un boîtier 2012 en métrique (2,0 mm x 1,2 mm).

ⁱ Note, 0805 est un boîtier standard de type montage en surface. Dans le cas de l'APP, nous disposons de résistances ¼ W en format *Through hole*.

2.3. LES CONDENSATEURS

Les composants électroniques nécessitent une tension d'alimentation pour fonctionner. Par exemple, le composant U2 est alimenté par les tensions +8V3 et -8V3 (cette notation 8V3 indique une tension de 8,3 V). Ces tensions sont générées à partir du +9 V et du -9 V du connecteur P1 moins les pertes dans les diodes D1 et D2, environ 0,7 V. Les composants électroniques peuvent être plus ou moins sensibles aux variations de leurs alimentations. Comme les condensateurs sont des dispositifs qui s'opposent aux variations de tension, ils seront utilisés afin de stabiliser la tension continue. Nous retrouverons toujours à l'entrée des circuits imprimés un condensateur avec une grande capacité énergétique. Il sert de *réservoir* au cas où il y aurait des demandes de courants importantes. Ces demandes auraient pour effet de faire chuter la tension des alimentations lorsque la source de tension ne pourrait fournir à la demande. Dans notre cas, les condensateurs C1 et C5 de 1000 μF ⁱⁱ jouent ce rôle. D'autres condensateurs plus petits sont distribués un peu partout dans le circuit. En réalité, chaque alimentation d'un circuit intégré possèdera son condensateur de découplage. Bien que localisés près de C1 et C5 dans le schéma, les condensateurs C2, C3, C6 et C7 de 0,01 μF , sont en réalité localisés physiquement près de U2 et de U4 dans le circuit afin de minimiser la longueur des fils et de leurs effets parasites indésirables. Leur rôle est un peu différent de celui de C1 et de C5. Ces petits condensateurs ont la particularité de mieux absorber les variations rapides de courant, mais ne sont pas capables de fournir une charge à long terme comme C1 et C5. Localiser ces condensateurs près des circuits intégrés augmente leur capacité à stabiliser localement leur alimentation. Attention, les condensateurs de 0,1 μF et les condensateurs de 100 nF sont identiques en valeurs, mais certains doivent être en céramique et d'autres en polyester. Il ne faut pas les mélanger puisque ceux polyesters ont une meilleure précision (et coûtent plus cher évidemment ...) et sont utilisés pour des raisons spécifiques comme le filtrage de signaux, tandis que ceux en céramique, moins précis et moins chers, sont utilisés pour le découplage (stabiliser les alimentations).

Les condensateurs C4, C13 et C19 doivent être de type polyester (ceux avec le boîtier en plastique jaune pâle).

Il existe plusieurs familles de condensateurs. Certains, dits non-polarisés, peuvent être branchés sans attention particulière à la polarité +/- du voltage appliqué à leurs bornes (par exemple, les condensateurs en céramique) (Figure 6). D'autres condensateurs ne fonctionnent bien uniquement la polarité est respectée; dans ce cas, la patte positive (pour les condensateurs tantale) ou négative (pour les condensateurs électrolytiques comme celui de la Figure 7) est identifiée. Ainsi, sur le schéma électrique, vous retrouverez à quelques endroits le symbole (+) près de certains condensateurs. Ce symbole représente un condensateur polarisé et indique qu'il faut faire attention à le mettre dans le bon sens lors du montage. Par exemple, la borne (-) du condensateur C5 sera placée sur la tension -9 V qui est plus basse que la tension 0 V ou GND. Un condensateur polarisé dont la polarité n'est pas respectée risque de littéralement exploser, parfois même après des minutes de fonctionnement présumé normal.

ⁱⁱ Bien que nous soyons tentés de dire 1 millifarad plutôt que mille microfarads, vous vous apercevrez que les condensateurs sont généralement exprimés en microfarad.



Figure 6. Condensateur céramique ne nécessitant aucune polarisation. Il peut être branché dans n'importe quel sens⁵.



Figure 7. Condensateur électrolytique nécessitant d'être polarisé : La patte la plus courte est la borne (-)⁶.

La sélection d'un condensateur se caractérise par 5 éléments recherchés pour compléter un BOM :

CAP CER 0,1 uF 10% 50V NPO RADIAL

- CER : indique la technologie du condensateur. Il en existe plusieurs : aluminium, électrolytique, céramique, tantale, polyester. Dans ce cas précis, CER indique une technologie céramique. La technologie utilisée est fonction du coût, de la précision et de caractéristiques internes. Pour l'APP1, les choix se limitent aux condensateurs électrolytiques et céramiques pour les alimentations et polyesters pour le filtrage. Les étudiants en GE approfondiront cette sélection dans les années à venir.
- 0,1 uF : indique la valeur de la capacité. Cette valeur est calculée en fonction d'équation ou de fiches techniques.
- 10% : c'est la précision nominale du condensateur. En plus de cette variation statistique, la valeur du condensateur varie en fonction de sa tension de polarisation et de la température.
- 50 V : représente la tension maximale que peut subir le condensateur. Au-delà de cette tension, il peut littéralement exploser. Le choix de cette valeur est réalisé en fonction de la tension maximale appliquée au condensateur plus une marge de sécurité. Par exemple, on utilisera des condensateurs de 25 V pour des tensions allant jusqu'à 15 volts environ. Pour les condensateurs utilisés près des composants électroniques, on regardera la tension d'alimentation du composant sachant que la tension appliquée au condensateur ne devrait pas dépasser cette valeur. Par exemple, le 555 opérera à 8,3 V. Les condensateurs l'entourant comporteront une tension de claquage > 15 V.
- NPO : réfère à la stabilité thermique du condensateur. Ces derniers peuvent avoir d'énormes variations en fonction de la température. NPO est un condensateur qui ne varie pas en fonction de la température. Il existe d'autres acronymes où X7R et Z5U sont les plus communs. La liste suivante résume les caractéristiques des condensateurs :
 - X8R (-55/+150, $\Delta C/C_0 = \pm 15\%$),
 - X7R (-55/+125 °C, $\Delta C/C_0 = \pm 15\%$),
 - X6R (-55/+105 °C, $\Delta C/C_0 = \pm 15\%$),
 - X5R (-55/+85 °C, $\Delta C/C_0 = \pm 15\%$),
 - X7S (-55/+125, $\Delta C/C_0 = \pm 22\%$),
 - Z5U (+10/+85 °C, $\Delta C/C_0 = +22/-56\%$),
 - Y5V (-30/+85 °C, $\Delta C/C_0 = +22/-82\%$).

Certaines compagnies n'utilisent pas cette nomenclature et il faut vérifier la fiche technique pour s'assurer que le condensateur réponde à nos besoins en tout temps.

- Radial : Représente le boîtier. Tout comme pour les résistances, le boîtier est important pour faciliter le montage des circuits. Actuellement, les condensateurs en montage en surface sont privilégiés pour leur plus faible coût d'assemblage. Dans le cas de l'APP, nous allons utiliser des boîtiers de type radial, car nous allons les souder à la main.

2.4. LA DIODE

Les diodes D1 et D2 sont des diodes de protection. Leur rôle est d'empêcher de faire sauter l'électronique au cas où l'utilisateur brancherait les sources de tension sur le connecteur P1 à l'envers. La particularité de la diode est de laisser passer le courant dans un seul sens. Ainsi le courant peut s'écouler dans la diode D1 depuis le connecteur vers la série de condensateurs C1, C2 et C3 et le restant du circuit. Cet écoulement s'accompagne malheureusement d'une perte de 0,7 V retenue par D1, comme le démontre les noms des nœuds +9V_{in} et +8V3. Cette nomenclature indique que +9 V doivent être présents sur le connecteur, mais que de l'autre côté de la diode, seulement 8,3 V seront disponibles. Dans le cas où la source de tension de 9 V serait branchée à l'envers, la diode D1 empêcherait le courant de s'écouler et prendrait toute la tension de 9 V à ses bornes. Les composants électroniques seraient alors protégés, car aucune tension ne sera présente à leurs bornes.

Le comportement de la diode est un peu plus complexe que le simple modèle du *sens unique pour le courant*, mais cette description est suffisante pour l'APP1. Le comportement complet des diodes sera couvert lors d'un APP plus tard en S1. Dans le cadre de l'APP1, considérez toujours les diodes avec ce modèle simple, c'est-à-dire aucun courant possible en polarité inverse et perte de tension constante de 0,7 V en polarité directe.

Attention, si vous testez la tension aux bornes des diodes D1 et D2 sans qu'il y ait de charge tirant du courant, la diode sera mal polarisée et une perte inférieure à 0,7 V pourrait ne pas être observée. Si vous faites une mesure de la tension, il est possible de lire n'importe quelle valeur entre 8,3 V et 9 V (aucun courant n'est tiré). Effectivement, le modèle simple ne représente pas bien le cas où il n'y a pas une certaine charge.

2.5. LE CAVALIER

Des cavaliers (J1, J2, etc.) (appelés en anglais *jumpers*) sont placés à quelques endroits stratégiques dans le circuit. Les cavaliers sont utilisés pour relier 2 fils (Figure 8). Dans le circuit, ils permettront de relier 2 modules, par exemple, la sortie de U1 et la patte 3 de U2A. Des broches de type *Molex* [7] espacées de 100 millièmes de pouces sont insérées dans le circuit imprimé à ces endroits. La présence de cavalier sur ces broches permet de relier les 2 circuits électriques alors que l'absence permet de les isoler électriquement. L'absence de cavalier permet, par exemple, de valider le fonctionnement de U1 sans l'influence des modules en aval. Cela permet aussi d'injecter des signaux dans le module en aval et d'en caractériser les performances avec un générateur de fonctions; ce qui offre une meilleure flexibilité. Lorsque les modules U1 et U2 semblent bien fonctionner, on ajoute le cavalier entre les 2 broches et l'on peut valider le fonctionnement de l'effet combiné des 2 circuits branchés ensemble.



Figure 8. À gauche, un cavalier⁸, à droite, le cavalier est placé sur 2 broches pour faire un court-circuit⁹.

2.6. LE POTENTIOMÈTRE

Un potentiomètre est une résistance variable basée sur un déplacement mécanique d'un curseur. La valeur d'un potentiomètre indique sa résistance totale maximale. Ainsi, si vous sélectionnez un potentiomètre de 10 k Ω , cette résistance se retrouvera entre les 2 bornes situées aux extrémités du potentiomètre (bornes A et B de la Figure 9).

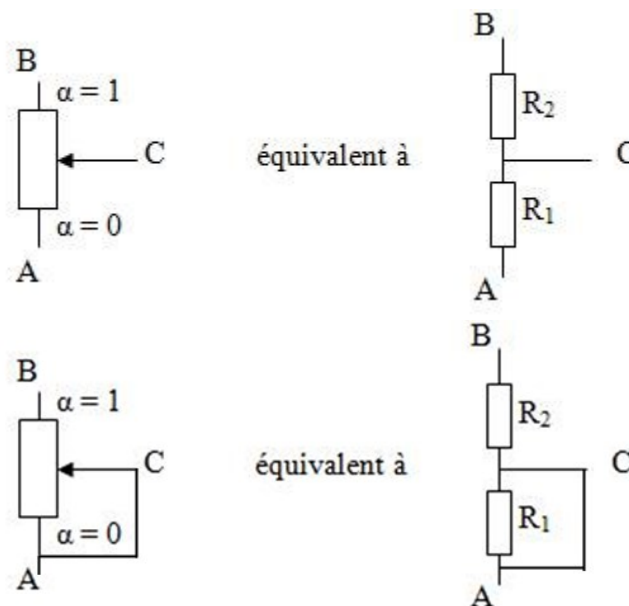


Figure 9. Schéma équivalent du potentiomètre selon 2 modes de branchement¹⁰

Le déplacement mécanique permettra de séparer la résistance totale en 2 résistances (R_1 et R_2) dont la somme des valeurs en Ohms est toujours égale à la valeur maximale du potentiomètre. Cette division de la résistance est disponible sur la borne C. Si on suppose que nous avons un potentiomètre de 10 k Ω , le glissement du curseur permettra de faire varier la résistance R_1 entre 0 Ω et 10 k Ω dans notre exemple. Inversement, R_2 passera de 10 k Ω à 0 Ω pour le même déplacement de curseur.

On peut se servir d'un potentiomètre pour faire un diviseur de tension. En effet, si l'on fixe une tension sur la borne B et que l'on met 0 V sur la borne A, la tension qui apparaîtra sur C sera égale au ratio de $R_1/(R_1 + R_2) \cdot V_B$.

Une croyance commune d'étudiant en début de baccalauréat est de penser qu'il faut absolument brancher les 3 bornes d'un potentiomètre, ce qui est faux. Si on désire avoir seulement une résistance variable, il est possible de n'utiliser que les bornes A et C ou encore B et C. Le déplacement mécanique ne tient pas compte du fait

qu'une borne soit branchée ou pas. Le potentiomètre n'est pas un composant "actif" comme un circuit intégré, c'est un composant passif.

2.7. LA DIODE ZENER

La diode Zener est utilisée généralement comme référence de tension. Dans le sens passant, la diode Zener agit comme une diode normale, avec une perte d'environ 0,7 V à ses bornes. La caractéristique principale de la diode Zener est de laisser un faible courant la traverser et de fournir une tension relativement fixe, si on fait couler un courant minimum à l'intérieur dans le sens inverse (sens où une diode normale bloque). Pour cela, elle doit être polarisée avec un courant suffisant (Figure 10).

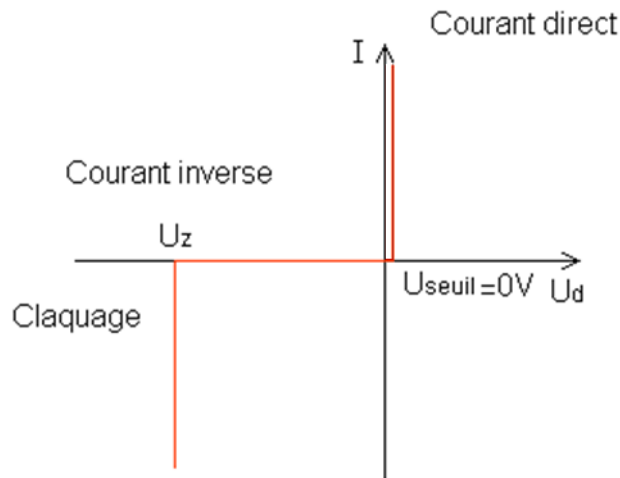


Figure 10. Caractéristique idéale de la diode Zener¹¹.

Pour faire cela, un circuit composé d'une résistance et d'une diode Zener peut être utilisé (Figure 11).

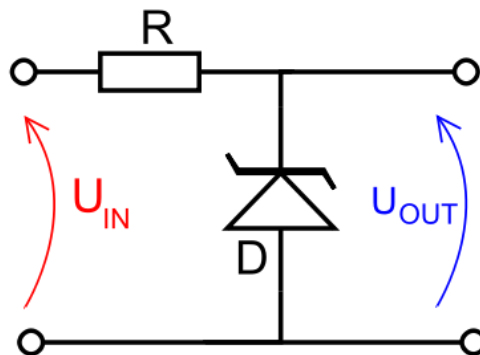


Figure 11. Exemple d'un circuit générant une tension relativement fixe si la diode est suffisamment polarisée¹².

La sélection de la diode est faite en fonction de la tension désirée (voir fiche technique de la diode Zener sur le site WEB). Ainsi si vous avez besoin d'une tension de 4,3 V, vous sélectionnerez la diode 1N4731. La colonne V_{znom} de la fiche technique indique la tension Zener à laquelle la diode va conduire. Juste à côté de cette colonne, vous retrouverez I_{zT} qui indique le courant nécessaire pour atteindre cette tension. La conception autour de diodes

Zener doit tenir compte de plusieurs considérations qui dépassent les compétences à atteindre à l'APP1. Nous allons nous limiter au cas simple où il n'y a pas de charge en parallèle avec la diode; ce qui est relativement vrai dans notre cas, car les amplificateurs ont une impédance d'entrée très élevée. Pour l'instant, on peut simplifier largement les calculs à effectuer. On connaît habituellement la tension en entrée (U_{in} de la Figure 11). Dans notre cas, cette tension sera fournie par la sortie du LM555. Lorsqu'on regarde dans les caractéristiques électriques du 555, on remarque que pour une alimentation de 15 V ou pour une alimentation de 5 V, la valeur de V_{oh} (voltage output high, tension de sortie du niveau "haut") correspond à $V_{cc}-1,7$ V pour un courant de 200 mA. Afin d'approximer, ne tenez pas compte de cette valeur pour votre calcul théorique de la résistance en série avec la zener, assumez que V_{oh} est égal à V_{cc} du 555. Montez le circuit avec la valeur de résistance de votre choix et vous pourrez mesurer la tension de sortie du 555 (patte 3) et valider si vous devez refaire le calcul de la résistance. Si la diode est bien polarisée (si son courant est $>$ que I_{ZT}), on connaît la perte qu'elle occasionne. Par exemple, la diode 1N4731 aura 4,3 V à ses bornes (ce qui est la tension présente à U_{out}). On est alors en mesure de calculer la tension présente sur la résistance R et comme on connaît le courant minimum qui doit couler dans la résistance (I_{ZT}), on peut appliquer la formule $V = RI$ et déterminer R .

2.8. LA DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE

La sortie de ce circuit alimente un interrupteur analogique et D4, une diode électroluminescente (DEL ou *light emitting diode* ou *LED* en anglais) [13]. Lorsqu'un courant de ≈ 10 mA s'écoule dans la DEL, une tension de ≈ 1.7 V apparaît à ses bornes et elle se met à émettre de la lumière. Sachant que la DEL est alimentée à 8,3 V et que le 555 (U3) pourra imposer une tension de ≈ 0 V à sa sortie, on vous demande de valider la valeur de R_{12} pour vous assurer qu'au moins 10 mA circulent dans la DEL. Vous en apprendrez plus sur le fonctionnement interne des diodes dans la session. Vous remarquerez que la DEL est mise en *pull-up*. C'est-à-dire qu'elle est branchée à l'alimentation positive et qu'un courant s'écoulera à l'intérieur de celle-ci quand une basse tension sera présentée à sa cathode (lire ici qu'elle sera allumée), donc lorsque la sortie du circuit intégré est à un niveau bas. Cette configuration est commune, car historiquement les circuits intégrés pouvaient tirer plus de courant que ce qu'ils pouvaient pousser. Remarquez alors que la DEL sera alors allumée en "logique inverse", c'est-à-dire lorsque la sortie du 555 est à zéro.

2.9. LES ALIMENTATIONS

La conception d'un circuit électronique exige d'apporter une source d'énergie pour que le circuit fonctionne. Dans notre cas, la source d'énergie est externe et provient de 2 sources de tension fixe de 9 V, qu'on utilisera pour générer des tensions de + 9 V et - 9 V par rapport à la référence (le "ground", "0V", "commun", "masse"). Il est possible de mettre les deux sources en série (Figure 12) si elles sont initialement *flottantes l'une par rapport à l'autre*, c'est-à-dire, non-référencées à un potentiel commun. On peut référencer n'importe quel nœud flottant à la masse. Par exemple, à la Figure 12, le nœud central est mis à la *masse* ou encore à la *tension de référence*. Il est fréquent de vouloir "mettre un circuit à la terre", c'est-à-dire connecter/référencer la tension de référence de notre circuit au "ground" de la prise 120V d'Hydro-Québec ("ground du secteur"). La source de tension de 9 V en bas de la masse dans la Figure 12 créera une tension inférieure à la masse à sa borne négative et nous attribuerons à ce nœud une tension de -9 V. Vous verrez comment réaliser ce montage durant l'APP1.

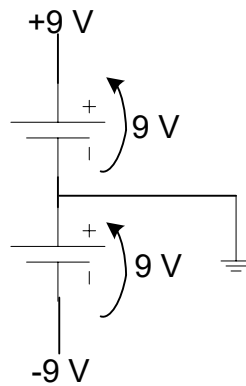


Figure 12. Deux sources flottantes mises en série peuvent créer une tension de +9 V et de -9 V.

La “mise à la masse” / “mise à la terre” est une question de sécurité ! Plusieurs de vos collègues pourront vous dire qu’il n’est pas nécessaire de mettre la masse dans un circuit. Dans la plupart des cas, il n’y aura pas de problème fonctionnel. Cependant, réaliser un circuit sans mise à la terre, c’est comme aller au laboratoire sans lunette. En mettant le circuit à la terre, on s’assure qu’il n’accumulera pas de charge statique par rapport au bâtiment. Le fait de ne pas référencer votre circuit à la masse pourrait faire en sorte que les sources flottantes accumulent des charges statiques: lorsque vous toucherez à votre circuit, les charges se déchargeront à travers vous! Votre “circuit +/-9V” pourrait très bien être centré à des milliers de volts par rapport au secteur. Il faut savoir qu’à partir de 50 V, dans certaines conditions, un arrêt cardiaque est possible! Pour cette raison, tous les boîtiers des appareils sont référencés à la masse. Pour la même raison, vous allez référencer tous vos montages à la masse pour éviter tout problème de sécurité. Nous serons très stricts à ce sujet lors de la validation.

2.10. LES CIRCUITS INTÉGRÉS

Le nom du circuit intégré est toujours indiqué dans un schéma réalisé selon les règles de l’art. Par exemple, U1 est un SE555P [14]. Notez qu’il existe plusieurs manufacturiers. Ainsi le composant 555 peut être appelé NE555, SE555, LM555 [15] selon la compagnie qui l’a fabriqué. Les lettres ajoutées en suffixe, par exemple le « P » dans SE555P, indiquent le type de boîtier. « P » signifie un boîtier avec broches à travers le circuit imprimé (*Dual in-line* (DIP)) (Figure 13). Il existe aussi des boîtiers de montage en surface (*surface mount* (SMT)) (Figure 14). Habituellement, tous les manufacturiers vont utiliser la même numérotation des pattes pour un même type de boîtier ce qui fait en sorte que l’on peut changer un composant d’une compagnie pour celui d’une autre sans problème. Il peut cependant exister quelques caractéristiques différentes au niveau électrique, car la fabrication du dispositif n’est pas entièrement identique, mais les boîtiers sont généralement compatibles. Vous retrouverez sur le site WEB de l’APP1 2 fiches techniques du 555, celle du NE555 et celle du LM555. Vous pourrez les comparer.



Figure 13. Boîtier de type DIP¹⁶.

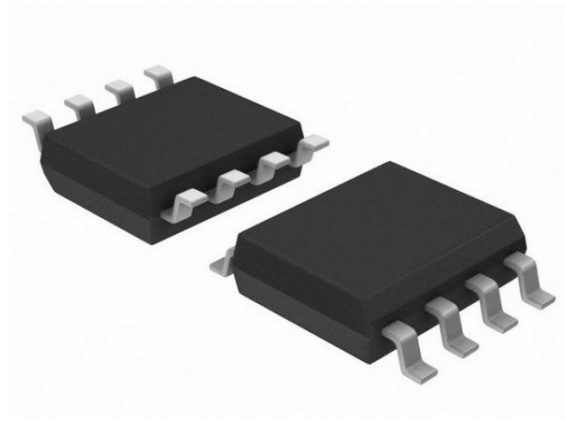


Figure 14. Boîtier de type SMT¹⁷.

La patte 1 d'un circuit intégré est indiquée par un point (Figure 15). Il peut être blanc ou encore par une incrustation dans le boîtier de plastique soit au bout du boîtier soit localisé à la patte 1 directement. La numérotation se fait en sens opposé des aiguilles d'une montre lorsqu'on regarde le boîtier du dessus.

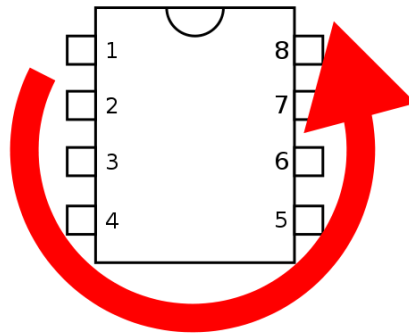


Figure 15. Numérotation de circuits intégrés¹⁸.

Sur le circuit imprimé, carte verte où on y soudera les pièces électroniques, une convention est que la métallisation de la patte 1 carrée alors que toutes les autres pattes seront rondes; par exemple, regardez U2 dans la partie en haut et un peu à droite dans la Figure 21. Il y a parfois d'autres méthodes d'identification.

Lors du montage de prototypes sur circuit imprimé, les erreurs sont fréquentes et il peut arriver de briser des circuits intégrés. Pour faciliter le déverminage, on optera pour un connecteur tampon (de l'anglais Socket carrier) (Figure 16- gauche). Ce connecteur tampon est soudé sur le circuit imprimé et le circuit intégré est inséré dans ce connecteur (Figure 16 – droite). Cette pratique permet de changer rapidement un circuit intégré défectueux sans avoir à le dessouder. Il est recommandé d'utiliser cette option lors de la soudure de votre prototypes. Vos compétences natives dans le domaine laissent entrevoir plusieurs heures de déverminages et plusieurs erreurs de débutant à tous les niveaux. Cette pratique pourra vous sauver plusieurs heures. Lorsque le circuit est fonctionnel et stable, le connecteur n'est plus utile et n'est pas assemblé en production de masse.

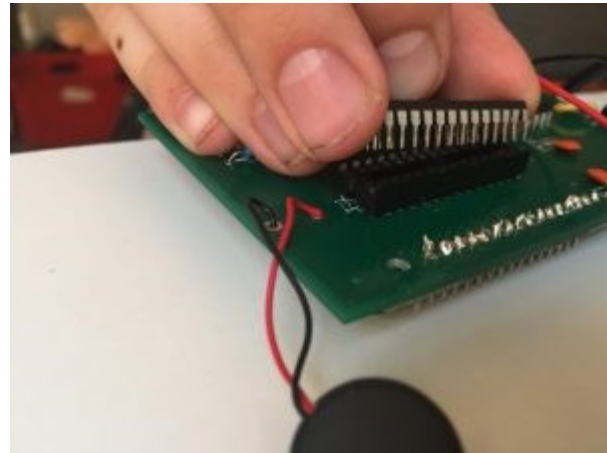


Figure 16. Le connecteur tampon (ou Socket) (gauche)¹⁹ est soudé sur le circuit imprimé et sert de réceptacle au circuit intégré (droite)²⁰.

2.11. L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

Vous allez sans doute remarquer que le composant U2 présente une particularité. Il possède une lettre supplémentaire dans son numéro de référence. Ainsi, vous retrouverez U2A, U2B... La raison de cette lettre supplémentaire provient du fait que le composant U2 est un circuit intégré (le LF444 [21] – voir fiche technique sur le site WEB de l'APP1) comportant quatre modules indépendants. La lettre indique quel module des 4 contenus dans le boîtier est utilisé. Par exemple, U2A utilisera l'amplificateur opérationnel aux pattes 1, 2 et 3; U2B utilisera celui des pattes 5, 6, 7. Pour l'APP1, il n'est pas nécessaire de connaître le fonctionnement interne des circuits intégrés. Ce sont des notions qui seront abordées en S2, approfondies en S3 et complétées S7-S8 pour ceux qui choisiront le module de spécialisation en microélectronique.

2.12. LE 555

Le 555 n'est ni plus ni moins qu'un comparateur avec une hystérésis (Figure 17) qui, lorsque la tension à son entrée *Threshold* dépasse un seuil correspondant à $2/3 V_{cc}$, la tension à sa sortie *Output* descendra à 0 V et lorsque la tension à son entrée *Threshold* atteindra un seuil bas correspondant à $1/3 V_{cc}$ la tension à sa sortie *Output* montera à sa tension d'alimentation. La sortie *Discharge*, quant à elle, sera à 0 V lors que la sortie *Output* est à 0 V, mais sera flottante lorsque la sortie *Output* est à la tension d'alimentation.

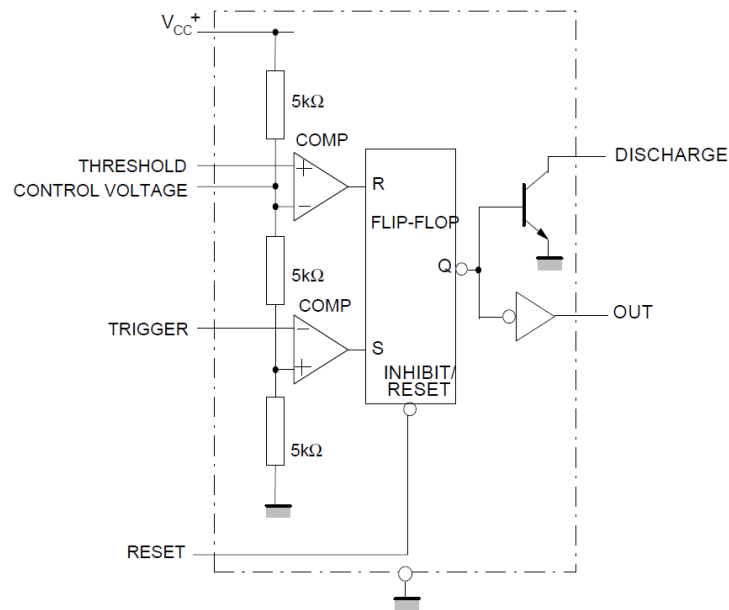


Figure 17. Schéma interne du 555¹⁴.

Le circuit 555 peut être utilisé pour opérer en différents modes dont les 2 plus communs sont les modes astable et monostable, correspondant respectivement à la génération d'un signal cyclique (exemple: une onde carrée) et à une impulsion seule, dont les paramètres sont fixés par les composants externes (résistances et condensateurs) et connexions.

2.12.1. MODE ASTABLE

Afin de réaliser une horloge (c.a.d. que la sortie *Output* n'est jamais stable, donc astable), nous tirerons profit du temps de charge et de décharge d'un circuit composé d'une résistance ou de résistances en série avec un condensateur (ex R_a , R_b et C dans la Figure 18).

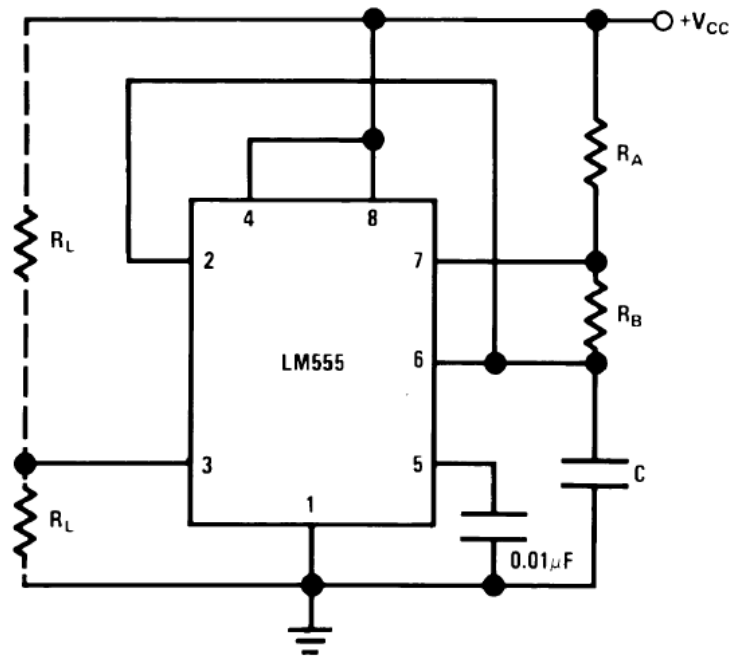


Figure 18. Montage en circuit astable¹⁵.

Une fois sous tension, le condensateur C se chargera jusqu'à $2/3$ de V_{cc} , à ce moment, la sortie *Discharge* localisée à la patte 7 et la sortie *Output* (patte 3) tomberont à 0 V et forceront le condensateur C à se décharger. Lorsque la tension aux bornes de C aura atteint $1/3$ de V_{cc} , la sortie *Discharge* deviendra flottante (donc aucun courant n'y entrera ou n'en sortira), la sortie *Output* montera à la tension d'alimentation et le condensateur se chargera à nouveau. Le cycle recommence ainsi indéfiniment. La vitesse de charge et de décharge se contrôle en fonction des résistances R_a et R_b . Différentes combinaisons donneront différentes vitesses de charge et de décharge, donc différentes vitesses d'horloge. La forme d'onde générée aux bornes du condensateur aura alors la forme d'une exponentielle (Figure 19).

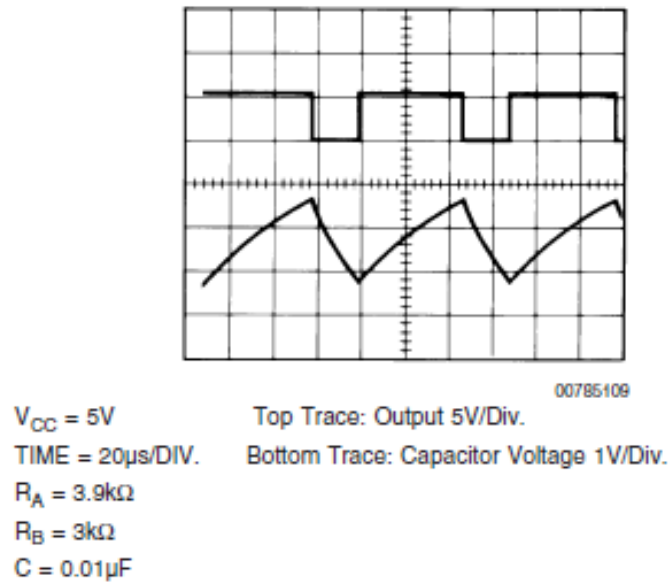


Figure 19. Sortie du 555 (trace du haut) et charge et décharge d'un réseau R-C (trace du bas).

L'intérêt de connaître les formes d'ondes sur les composants autour du 555 est qu'il est possible, connaissant les tensions minimum et maximum ainsi que la fréquence du signal, de déterminer théoriquement la puissance dissipée dans chacun des composants l'entourant.

Les fiches techniques du NE555 et du LM555 vous indiquent un mode spécial d'astable où le rapport cyclique est de 50 % (normalement impossible à obtenir dans la configuration normale de l'astable). Cette configuration sera détaillée dans la section 2.12.3.

2.12.2. MODE MONOSTABLE

Le mode monostable du 555 est un mode où un seul état est stable (c.-à-d. l'état de repos). Lorsqu'un front descendant est observé à l'entrée *Trigger* (patte 2), la sortie *Output* passera à l'état haut, la sortie *Discharge* deviendra flottante et le condensateur pourra se charger. Lorsque le condensateur atteindra $2/3$ de V_{CC} , la sortie *Discharge* court-circuitera le condensateur, le déchargeant rapidement, et la sortie *Output* retombera à 0 V. Le système sera stable dans cet état jusqu'au prochain « *Trigger* ». On pourra contrôler la durée de l'impulsion présente à la sortie *Output* en contrôlant la vitesse de charge du condensateur à l'aide de la résistance.

Le mode monostable se présente sous deux configurations : avec ou sans réenclenchement. Il est possible, via les connexions de certaines broches, de décider si une deuxième impulsion sur « *Trigger* » est ignorée pendant qu'une impulsion de sortie est déjà en cours, ou si la temporisation de l'impulsion de sortie est réinitialisée. Référez-vous à la fiche technique pour plus de détails.

2.12.3. LE GÉNÉRATEUR D'ONDES CARRÉES HAUTE FRÉQUENCE

Dans le cadre de l'APP, ce module sert à générer une onde carrée 0 – 5 V d'une fréquence < 1 kHz à l'intérieur des précisions demandées dans la Figure 1. Schéma-bloc du circuit *avertisseur sonore de marche arrière*. Le circuit sera basé sur un 555 opéré en mode astable. La topologie sélectionnée est la seule permettant d'obtenir une onde carrée avec un rapport cyclique de 50 %. Vous la retrouverez dans la fiche technique du NE555 dans la section *50 % duty cycle*. Vous devez calculer les résistances R3 et R6 et le condensateur C14 qui permettront

d'obtenir approximativement les caractéristiques désirées. Il sera, en effet, très difficile d'obtenir la précision fréquentielle désirée avec des résistances précises à 5 % et des condensateurs précis entre 10 % et 20 %. Pour cette raison, un potentiomètre a été ajouté en série avec R3. Il pourra ajuster la fréquence et le rapport cyclique du circuit. Vous devrez choisir R3 en tenant compte du potentiomètre que vous aurez sélectionné; c'est-à-dire que vous devrez retrancher la demi-valeur du potentiomètre de la valeur totale de R3 calculée.

Vous verrez que le calcul des résistances et du condensateur dans cette topologie ne peut pas se résoudre analytiquement, car il y a trop d'inconnues, pas assez de contraintes. L'approche est de simplifier les calculs fixant certains paramètres. Par exemple, on pourrait supposer que $R3 = R6$. Il ne faut cependant pas fixer trop de paramètres, car la résolution des équations peut mener à des incongruités. Une approche souvent utilisée est de fixer d'abord la valeur des condensateurs et de calculer les résistances ensuite. Le raisonnement derrière cette approche vient du fait que le choix des valeurs des condensateurs est relativement limité alors que le choix des résistances est beaucoup plus flexible. Ainsi, les concepteurs fixeront la valeur des condensateurs à des valeurs très utilisées comme 1 nF, 10 nF, 100 nF, 1 μ F ou encore 10 μ F et calculeront les résistances appropriées à partir des équations contenues dans les fiches techniques. Plusieurs options sont ainsi possibles, mais certaines seront éliminées d'office par exemple lorsque les calculs mèneront à des résistances $< 50 \Omega$ ou $> 1 M\Omega$. En deçà de 50Ω , la résistance des interconnexions (soudure, fils) de la plaquette ou du circuit imprimé influence trop grandement le circuit et il est difficile de faire un circuit avec un comportement prédictible. En haut de $1 M\Omega$, les courants deviennent très faibles à des tensions d'alimentation ≈ 10 V et peuvent être influencés plus facilement par les ondes électromagnétiques environnantes; ce qui se traduit par une possibilité de fonctionnement erratique du circuit. Notez que tout appareil électronique émet des ondes électromagnétiques perturbatrices. Par exemple, voici une liste des appareils qui se trouveront près de votre circuit dans le laboratoire et qui peuvent influencer votre circuit : cellulaire, ordinateur, écran d'ordinateur, générateur de fonctions, oscilloscope, multimètre, fluorescents...

Les valeurs de résistances doivent faire partie de la série E24 disponible en libre-service aux locaux C1-3018 et C1-3024; pour le condensateur vous avez quatre valeurs possibles dans votre sac de pièces (0,1 μ F, 1 μ F, 10 μ F et 33 μ F).

Dans le cas de la topologie sélectionnée, une difficulté supplémentaire apparaît. Il faut résoudre une fonction transcendante. La façon de résoudre cette fonction est expliquée dans la section 5 de cette annexe.

Vous remarquerez que le 555 doit produire une tension de $5 \text{ V} \pm 10 \%$ (Figure 1). Afin d'obtenir cette tension, un régulateur à diode Zener [22] a été utilisée (D3). On vous demande de calculer la valeur de la résistance R4 pour bien polariser D3. Vous supposerez qu'il n'y a pas de charge en parallèle à D3 et que tout le courant passant dans R4 s'en va dans D3; ce qui est une bonne approximation. Les étudiants de génie électrique pourront apprécier davantage cette approximation en S3. Pour effectuer le calcul de R4, référez-vous à la section 2.7 de cette annexe.

2.12.4. GÉNÉRATEUR D'ONDES CARRÉES BASSE FRÉQUENCE

Le générateur d'ondes carrées basse fréquence se base également sur un circuit 555. Cependant, la topologie utilisée dans ce cas-ci est plus répandue que pour la topologie du générateur haute fréquence et peut être trouvée dans toutes les fiches techniques du 555. Cette architecture ne permet pas un rapport cyclique exactement de 50 %, mais notre application n'en souffrira pas. Utilisez une approche de conception similaire au générateur d'ondes carrées haute fréquence à l'exception que les équations pourront être résolues

analytiquement en fixant la valeur du condensateur C20. Pour le condensateur, vous avez les mêmes quatre valeurs possibles dans votre sac de pièces (0,1 μ F, 1 μ F, 10 μ F et 33 μ F).

Attention, dans la fiche technique l'équation du rapport cyclique est décrite comme étant le temps off sur la période totale et non l'inverse, qui est souvent utilisé (Figure 20).

The charge time (output high) is given by:

$$t_1 = 0.693 (R_A + R_B) C$$

And the discharge time (output low) by:

$$t_2 = 0.693 (R_B) C$$

Thus the total period is:

$$T = t_1 + t_2 = 0.693 (R_A + 2R_B) C$$

The frequency of oscillation is:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B) C}$$

Figure 6 may be used for quick determination of these RC values.

The duty cycle is:

$$D = \frac{R_B}{R_A + 2R_B} = \frac{t_2}{t_1 + t_2}$$

Figure 20. Équations de la fiche technique du LM555².

2.13. AMPLIFICATEUR AVEC GAIN UNITAIRE

Un circuit à gain de tension unitaire est réalisé autour de U2A. Le signal à la patte 1 est une copie de l'entrée à la patte 3. L'amplificateur avec gain unitaire agit comme étage tampon et permet de fournir le courant nécessaire aux circuits subséquents sans affecter le fonctionnement des circuits précédents. Il n'était pas nécessaire d'utiliser ce circuit, car l'impédance (lire ici résistance) d'entrée du circuit intégrateur est stable et élevée. Cependant, ce circuit présente un intérêt pour vos montages électroniques lorsque le circuit générant le signal n'a pas assez de puissance, ou une impédance de sortie trop élevée, pour bien fournir ses charges.

2.14. INTÉGRATEUR

Le circuit intégrateur est réalisé autour de U2B avec les composants, C11, R5, R1, C8 et R9. Il n'est pas important, voire inapproprié, de comprendre pour l'instant le fonctionnement électronique de l'intégrateur. Utilisez-le comme il est. Cependant, il est important de maîtriser les mathématiques permettant d'intégrer un signal. Vous remarquerez que l'intégrateur comporte un signe (-) dans la Figure 1. Ce signe négatif origine d'une contrainte électronique. En effet, la topologie la plus simple pour un intégrateur nécessite d'entrer par la borne négative de l'amplificateur opérationnel (patte 6 dans ce cas-ci). Cette topologie très commune a pour effet d'inverser le signal en sortie. Cela n'a pas d'influence sur le circuit comme tel, car l'utilisateur sera insensible à écouter une sinusoïde ou une sinusoïde déphasée de 180° étant donné qu'il n'a pas de référentiel pour l'apprécier. Vous en apprendrez plus sur les amplificateurs opérationnels en S1 et en S2.

2.15. FILTRE PASSE-BAS

Le monde des fréquences sera abordé en S2. Pour l'instant, contentez-vous de savoir qu'il y a une dualité entre l'allure temporelle d'un signal, et son allure fréquentielle (ou spectrale). Une onde carrée et une onde triangulaire sont, en réalité, composées d'une somme d'ondes sinusoïdales à différentes fréquences (les *harmoniques*). Un *filtre* est un circuit duquel on dit souvent qu'il altère le spectre (l'allure fréquentielle) du signal. Lorsqu'on applique un filtre *passé-bas* à un signal, cela signifie simplement que l'on atténuera les hautes fréquences. Il est aussi possible d'appliquer un filtre *passé-haut* qui aura l'effet inverse. Dans notre cas, le filtre a été conçu afin de retirer toutes les fréquences de l'onde triangulaire supérieures à 1 kHz et d'en conserver la *fondamentale*, soit une sinusoïde de 1 kHz.

Le filtre *passé-bas* est basé autour de U2C et comprend les composants R7, R8, C13, C4, R2 et R10. Utilisez ce filtre tel quel.

2.16. INTERRUPTEUR ANALOGIQUE

La sortie du filtre *passé-bas* générera une onde sinusoïdale dont l'amplitude doit être modulée pour être audible seulement la moitié de la période de 1/0,5 Hz. Cette opération est réalisée par l'interrupteur analogique U4 dont le rôle est de laisser passer ou pas le signal de sa patte 1 vers sa patte 8, dépendamment du niveau sur sa patte 6. Si un niveau bas (≈ 0 V) est présent sur la patte 6, la patte 8 n'est plus reliée à la patte 1 et l'entrée de U5 reçoit un signal continu (pas d'oscillation). Regardez les fiches techniques du DG418 [23] pour plus de détails sur son fonctionnement.

Il n'y a pas de conception à faire autour de l'interrupteur. Utilisez-le tel quel. Les étudiants en génie électrique apprendront davantage sur ce sujet en S3.

2.17. AMPLIFICATEUR AUDIO LM386

Fournir le courant nécessaire à un haut-parleur pour son fonctionnement n'est pas une mince tâche et il faut des circuits intégrés spécialisés capables de pousser et tirer beaucoup de courant comme le LM386 [24]. Le LM386 est premièrement un circuit d'amplification suivi d'un étage de puissance. La topologie recommandée par le manufacturier est utilisée, avec les composants R15, C19 et C17. Vous utilisez cette topologie telle quelle.

Une pratique courante en conception de circuit électronique est de travailler avec des signaux dans l'ordre du volt afin de s'immuniser autant que possible au bruit environnant (exemple le bruit généré par les *ballasts des fluorescents*). C'est dans cette optique que la chaîne intégrateur - filtre *passé-bas* a été pensée. La sortie du filtre *passé-bas* comporte un signal de $\approx 1,6 V_{\text{crête}}$. Cependant, à la lecture de la fiche technique du LM386, on remarque que ce circuit intégré comporte un gain interne variant entre 20 et 200 selon le réseau R-C (lire ici résistance-condensateur) placé entre les pattes 1 et 8 (voir fiche technique du LM386). Nous faisons face à un problème, car même avec le gain minimum de 20, la tension à la sortie du LM386 serait de $20 * 1,6 V = 32 V_{\text{crête}}$!!! Cela est impossible, car le LM386 est alimenté à $\pm 8,3 V$. Il est important de comprendre que les circuits intégrés peuvent seulement fonctionner à l'intérieur de leurs tensions d'alimentation (positives et négatives). Les circuits électroniques tirent du courant de leur alimentation positive pour la fournir à leur sortie ou encore tirent du courant de leur sortie pour le pousser dans l'alimentation négative. Ainsi, même si on injecte une tension de 9 V à l'entrée de l'amplificateur avec gain unitaire, sa sortie ne pourra jamais dépasser 8,3 V moins quelques pertes (il y aura saturation pour des amplitudes trop grandes).

Afin de résoudre cette problématique, nous avons ajouté à l'entrée du LM386 une résistance (R14) et un potentiomètre (R16). Vous allez utiliser ces 2 composants pour réduire la tension à l'entrée du LM386. Sachant que l'on désire avoir ≈ 3 V à la sortie du LM386 lorsqu'on a $\approx 1,6$ V_{crête} à la sortie du filtre passe-bas et que le LM386 a un gain fixé à 20 (voir la topologie utilisée sur le schéma électrique), vous devez effectuer la conception d'un diviseur de tension capable d'accommoder les signaux.

2.18. CONNECTEUR J3, INTERRUPTEUR S1 ET LE HAUT-PARLEUR

L'oreille humaine a une acuité pour les signaux autour de 1 kHz. C'est un son relativement agressant. Vous pourrez concevoir que si 24 équipes travaillent dans le même laboratoire et émettent ce signal en continu ou presque, vos nerfs seront mis à dure épreuve. Pour cette raison, nous avons ajouté le connecteur J3 dans lequel vous pourrez brancher vos écouteurs personnels. Faites attention, vous devrez baisser le volume avec le potentiomètre R16, car l'impédance (résistance interne) de vos écouteurs est différente de celle du haut-parleur. Nous avons aussi ajouté un interrupteur (S1) qui permettra de diriger le signal vers le haut-parleur ou les écouteurs.

Un truc pour minimiser le volume du son du haut-parleur est de mettre un ruban gommé dessus. Il n'est pas nécessaire de mettre le connecteur J3 sur votre plaquette de montage, mais il est important de tester le haut-parleur.

2.19. LES COMPOSANTS NON BRANCHÉS

Dans le cas de l'utilisation de circuits intégrés comportant plusieurs circuits identiques dans un même boîtier comme le LF444, il est de bonne pratique courante de fixer les entrées non utilisées à une tension connue. C'est ce qui a été fait dans le cas de U2D où toutes les entrées ont été branchées à la masse. Cette pratique est tout particulièrement importante pour les circuits intégrés en technologie CMOS. Vous apprendrez à identifier les circuits intégrés dans cette technologie tout au long de votre formation.

2.20. LE CIRCUIT IMPRIMÉ

Le circuit imprimé (Figure 21) se compose de 2 couches de métallisation (dessus, dessous). De façon globale, les petits composants (résistances et condensateurs) sont regroupés autour du circuit intégré auquel il est associé. L'entrée principale des alimentations + 9 V et - 9 V est en haut à gauche et le haut-parleur et le connecteur pour les écouteurs sont à droite. À chaque coin, vous retrouverez des trous mécaniques dans lesquels vous pourriez insérer des vis de montage ou des pattes pour surélever le circuit. Vous retrouverez sur le circuit imprimé plusieurs points de tests identifiés par l'acronyme TP et plusieurs points de masse appelés TP_GND. Faites attention lors du montage à la polarisation des condensateurs (ex. C1 et C5) et des diodes (ex. D1 et D2).

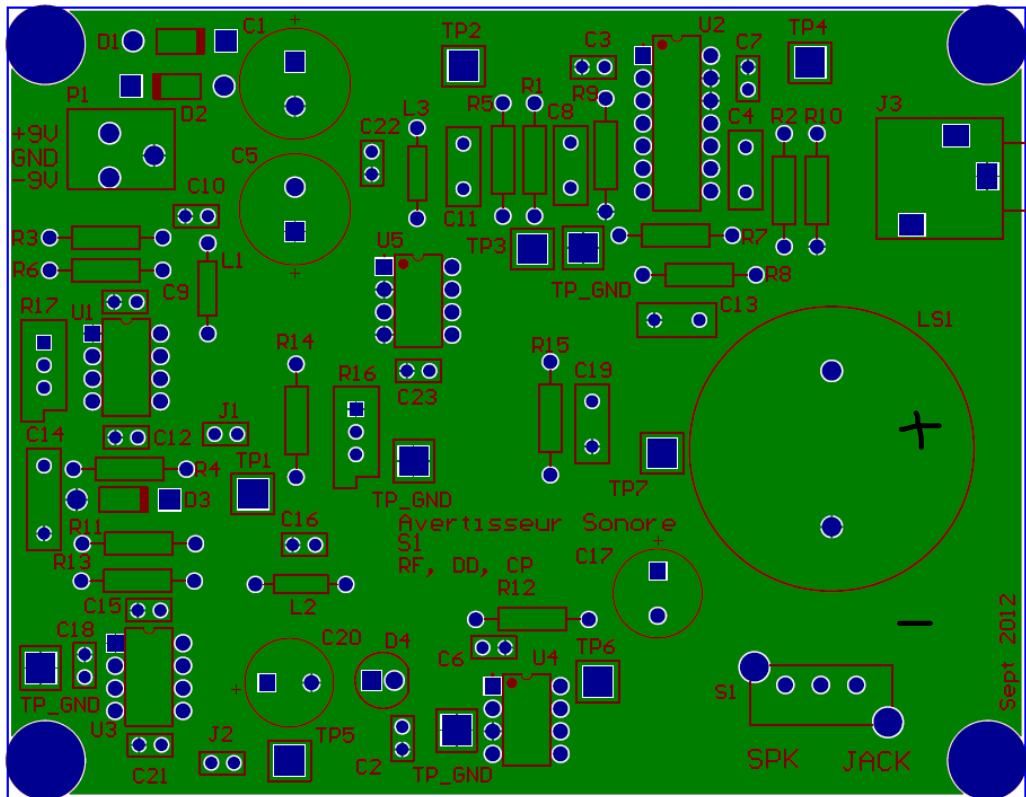


Figure 21. Le circuit imprimé.

3. LA LISTE DE MATÉRIEL OU BOM

Le terme **BOM** vient de l'anglais *Bill of Material*. Il s'agit de la liste des composants électroniques nécessaires à la fabrication du circuit électronique. À partir de ce BOM, il est possible à un personnel de l'approvisionnement de commander les bons composants électroniques.

Le BOM de votre projet contient **6 colonnes** soit le type de pièce à commander (ex. 555), la référence sur le circuit imprimé (U1), le numéro du fabricant qui fabrique le composant (SE555P), le fabricant (Texas Instrument), le numéro du distributeur du composant (296-9684-5-ND) ainsi que le nom du distributeur (Digi-key).

Vous remarquerez que la liste de matériel ci-dessous contient 2 lignes avec des symboles « ? ». Ce sont les composants que vous devez calculer et valider. Notez qu'il n'est pas obligatoire d'avoir des résistances $\frac{1}{4}$ W à ajouter au BOM, car il est possible que des $\frac{1}{10}$ W fassent l'affaire pour un coût moins cher. Justifiez le choix du boîtier en fonction de la puissance à dissiper dans votre rapport et/ou validation. Portez attention à toute l'information nécessaire pour réaliser une commande de composants électroniques. Toute cette information doit se retrouver facilement, car le service de l'approvisionnement pourrait se servir de cette dernière pour trouver un composant équivalent d'une autre compagnie.

Tableau 3. Liste de matériel de la problématique de l'APP1 à compléter.

Type de pièce	Désignateur de référence	No.	Fabriquant	No. du distributeur	Distributeur
555	U1, U3	SE555P	Texas Instruments	296-9684-5-ND	Digi-Key
Amplificateur opérationnel	U2	LF444ACN	Texas Instruments	LF444ACN/NOPB-ND	Digi-Key
Interrupteur analogique	U4	DG418DJ-E3	Vishay Siliconix	DG418DJ-E3-ND	Digi-Key
Amplificateur audio	U5	LM386N-1	Texas Instruments	LM386N-1/NOPB-ND	Digi-Key
Diode	D1, D2	1N4007-G	Comchip Technology	641-1312-1-ND	Digi-Key
Diode zener 5,1 V	D3	1N4733A,113	NXP Semiconductors	568-1362-1-ND	Digi-Key
LED rouge 3 mm	D4	55-532-0	Mode Electronique	mod-55-532-0	Raybel
Haut-parleur	LS1	AST-03208MR-R	PUI Audio, Inc.	668-1139-ND	Digi-Key
Potentiomètre 1 kΩ	R16, R17	3362U-1-102LF	Bourns Inc.	3362U-102LF-ND	Digi-Key
Support IC 8 pattes	U1, U3, U4, U5	A08-LC-TT-R	Assmann WSW Components	AE9986-ND	Digi-Key
Support IC 14 pattes	U2	1-390261-3	TE Connectivity	A100205-ND	Digi-Key
Bornier	P1	1990012	Phoenix Contact	277-1795-ND	Digi-Key
Connecteur stéréo	J3	SJ1-3513	CUI Inc	CP1-3513-ND	Digi-Key
Cavalier	J1, J2	36-100-0	Mode Electronique	mod-36-100-0	Raybel
Connecteur (Header)	J1, J2	36-140G-0	Mode Electronique	mod-36-140G-0	Raybel
Interrupteur	TP7	MHS12204	TE Connectivity	450-1567-ND	Digi-Key
Ferrite	L1, L2, L3	EXC-ELSA35	Panasonic Electronic Components	P9820BK-ND	Digi-Key
Point de test	TP	5011	Keystone Electronics	5011K-ND	Digi-Key
RES 82K OHM 1/4W 5% AXIAL	R9	82K $\frac{1}{4}$ W	Yageo	82KQBK-ND	Digi-Key
RES 10 OHM 1/4W 5% AXIAL	R15	10 $\frac{1}{4}$ W	Yageo	10QBK-ND	Digi-Key
RES 390K OHM 1/4W 5% AXIAL	R1	390K $\frac{1}{4}$ W	Yageo	390KQBK-ND	Digi-Key
RES 130K OHM 1/4W 5% AXIAL	R2	130K $\frac{1}{4}$ W	Yageo	130KQBK-ND	Digi-Key
RES 100K OHM 1/4W 5% AXIAL	R5, R10	100K $\frac{1}{4}$ W	Yageo	100KQBK-ND	Digi-Key
RES 1,6K OHM 1/4W 5% AXIAL	R7, R8	1,6K $\frac{1}{4}$ W	Yageo	1.6KQBK-ND	Digi-Key

Résistances à calculer par les étudiants	R3, R4, R6, R11, R12, R13, R14	?	?	?	?
CAP FILM 1 UF 5% 50VDC RADIAL	C11	ECQ-V1H105JL3	Panasonic Electronic Components	P4537TB-ND	Digi-Key
CAP ALUM 1000 UF 20% 50V RADIAL	C1, C5	UVR1H102MHD ECA-1HM102	Nichicon Panasonic	493-1111-ND P5186-ND	Digi-Key
CAP ALUM 220 UF 20% 50V RADIAL	C17	ECA-1HM221B	Panasonic Electronic Components	P10398TB-ND	Digi-Key
CAP FILM 0,1UF 5% 100VDC RADIAL	C4, C13, C19	R82EC3100AA70J	Kemet	399-5861-ND	Digi-Key
CAP FILM 10000 PF 5% 50VDC RADIAL	C8	QYX1H103JTP	Nichicon	493-3455-ND	Digi-Key
CAP CER 0,1 UF 50V RADIAL	C9, C10, C15, C16, C22, C23	K104Z15Y5VF5TL2	Vishay BC Components	BC1160TR-ND	Digi-Key
CAP CER 10000 PF 50V 10% RADIAL	C2, C3, C6, C7, C12, C18, C21	K103K15X7RF5TL2	Vishay BC Components	BC1078TR-ND	Digi-Key
Condensateurs à calculer par les étudiants au choix entre (0,1 μ F, 1 μ F, 10 μ F et 33 μ F)	C14, C20	?	?	?	?
PCB					

4. ÉVALUATION THÉORIQUE ET PRATIQUE DE LA PUISSANCE CONSOMMÉE

Lorsqu'on fait la conception d'un circuit, il est important d'en évaluer la consommation totale de puissance ainsi que la puissance de chacun des composants. D'une part, la puissance consommée pour chacun des composants permet de choisir la dimension du boîtier et du mécanisme de refroidissement (radiateur, ventilateur, refroidisseur à l'eau, etc.) et d'autre part, la somme des puissances individuelles de chaque composant branché sur une alimentation permet d'estimer la puissance nécessaire aux régulateurs de tension et par extension de la puissance totale nécessaire au fonctionnement du circuit. Dans le cas de la problématique, nous sommes branchés directement sur une alimentation externe, ce qui ne cause pas de problème, mais ce n'est pas toujours le cas. Vous pouvez prendre exemple sur le chargeur de votre cellulaire, ordinateur portable ou autres appareils électroniques. Si votre circuit consomme beaucoup de puissance, vous allez avoir besoin d'un bloc d'alimentation plus gros que le simple port USB souvent utilisé dans ce genre d'appareil et les coûts fabrication/vente en seront plus élevés.

La puissance consommée s'évalue en 2 étapes. La première étape consiste à évaluer la puissance statique ; c'est-à-dire sans excitation du circuit. C'est la consommation dite *direct current* en anglais ou DC. La seconde étape consiste à évaluer la puissance dynamique. C'est la puissance lorsque le circuit est excité par une source qui varie dans le temps. C'est une consommation dynamique ou AC de l'anglais *alternating current*. Les prochaines sections couvrent ces aspects.

4.1. PUISSANCE MOYENNE CONSOMMÉE AVEC UNE EXCITATION CONTINUE

4.1.1. PUISSANCE MOYENNE CONSOMMÉE PAR LES RÉSISTANCES, CONDENSATEURS ET INDUCTANCES

La puissance moyenne pour la résistance est relativement simple, il faut multiplier la valeur de la résistance par son courant au carré ou encore diviser la tension au carré par la valeur de la résistance.

$$P = VI = RI^2 = V^2/R \quad (4-1)$$

Les capacités et inductances emmagasinent de l'énergie et la redonnent au circuit. Elles dissipent de l'énergie seulement par les pertes provenant de leurs imperfections. Dans notre cas, ces pertes en DC sont négligeables et nous n'allons pas en tenir compte.

Pour les pièces non-linéaires tels les diodes et les transistors, il faut appliquer l'équation: $P = VI$. Dans ce cas, il faut trouver la tension DC à laquelle opère le dispositif et déterminer le courant y passant. Par exemple, une diode de protection aura une perte de 0,7 V (section 2.4) lorsqu'un courant DC de 1 A y passe. La puissance DC est alors 0,7 W.

4.1.2. PUISSANCE MOYENNE CONSOMMÉE PAR LES COMPOSANTS COMPLEXES

Les circuits intégrés que vous utilisez (ex. LM555, LF444, LM386, etc.), peuvent dissiper une puissance moyenne importante. Cette dissipation est fonction de la technologie dans lequel est fabriqué le circuit intégré, de la complexité des fonctions qu'il réalise, de sa tension d'opération. Cette dissipation est nécessaire pour faire fonctionner les transistors qui composent les circuits intégrés dans le mode d'opération désiré. Évaluer la

consommation de ces composants peut devenir une aventure et il faut bien regarder la fiche technique du fabricant. Pour les 2 paragraphes suivants, ouvrez la fiche technique du LM555 disponible sur le site WEB.

À la page 3 de 12 de la fiche technique, le premier encadré indique les conditions maximales d'opérations (**Absolute maximum rating**) du LM555. Entre autres, on voit que la tension maximale d'opération est +18 V, que la dissipation maximale du boîtier est de 1180 mW, que la température d'opération normale est de 0 °C à +70 °C et que la température d'entreposage est de -65 °C à +150 °C. Finalement, il contient quelques informations sur la façon de souder ce composant en fonction des boîtiers sélectionnés. Théoriquement, on ne doit jamais s'approcher des valeurs présentées dans cet encadré, car elles mèneront à la destruction du 555 si elles sont dépassées.

L'encadré des caractéristiques électriques (**Electrical Characteristics**) contient la plupart des informations recherchées dans notre quête de la puissance consommée. Entre autres, on peut y voir que le 555 peut fonctionner nominalement quand la tension d'alimentation (*Supply voltage* ou V_{cc}) varie entre 4,5 V et 16 V. On remarque que le 16 V est inférieur aux 18 V indiqués dans la section des conditions maximales d'opération. On peut aussi voir que le courant consommé, habituellement représenté par I_{cc} (c.-à-d. le courant consommé sur l'alimentation V_{cc}) est au maximum de 6 mA si la tension d'alimentation est de 5 V et de 15 mA si la tension d'alimentation est de 15 V. Cela est valide si la charge R_L est infinie ; ce qui est normal, car si R_L n'est pas infinie, le 555 devra également fournir la puissance pour cette charge. Nous pouvons calculer une puissance moyenne variant entre 30 mW (5 V et 6 mA) et 225 mW (15 V et 15 mA). Cependant qu'arrive-t-il si nous opérons le 555 à une tension d'alimentation de 10 V, par exemple? N'ayant pas la réponse exacte dans la fiche technique, il est souvent raisonnable de faire une règle de 3 pour approximer la consommation. Nous arrivons à une différence de courant de 0,9 mA par volt ($((15 - 6) \text{ mA}) / (15 - 5) \text{ V}$) ce qui permet de calculer un courant de 10,5 mA pour une alimentation de 10 V. Au final, nous pouvons estimer la consommation à 105 mW dans cet exemple.

Prenons un second exemple avec le LF444. Ouvrez la fiche technique du LF444 disponible sur le site WEB. Allez à la page 3 de 14. On y retrouve encore l'encadré *Absolute maximum rating*. Parmi les données intéressantes, on voit que la tension d'alimentation maximale est de $\pm 18 \text{ V}$ pour le LF444 et que le *Output Short Circuit Duration* est à « Continuous ». On remarque que cette valeur est à « Continuous » tant que l'on n'excède pas la dissipation du boîtier. Ainsi, si l'on court-circuite la sortie de l'amplificateur, il n'y aura pas de bris de nature électrique (par contre, ça pourrait entraîner une surchauffe, un deuxième type de problème). On peut aller chercher le courant consommé par le LF444 dans l'encadré *Supply current* de la section de *DC Electrical Characteristics*. On y retrouve 1,0 mA maximum et le symbole utilisé est I_s . Cependant, on ne fournit pas dans cette section à quelle tension ces mesures sont prises. Si vous regardez à droite du titre *DC Electrical Characteristics*, la fiche technique fait appel à la note 5. On peut y lire que la tension d'alimentation V_s est de $\pm 15 \text{ V}$. La puissance maximale de ce circuit est donc de 30 mW (c.-à-d. 30 V et 1 mA). Cette fiche technique ne nous permet pas d'interpoler comme la précédente pour des alimentations de $\pm 10 \text{ V}$ par exemple. Ainsi, pour s'assurer du bon fonctionnement des alimentations de ce circuit, nous allons nous assurer qu'elles puissent fournir 30 mW en tout temps. Certaines fiches techniques utiliseront une notation légèrement différente pour la consommation statique et utilisera le terme *bias* ou I_b . À notre niveau, ces termes sont équivalents. Plus tard, dans le baccalauréat en GE, la distinction pourra être réalisée selon l'endroit où est consommée la puissance dans le circuit intégré.

Les 2 exercices précédents ont mis en exergue que l'évaluation de la puissance moyenne n'est pas une chose triviale et qu'il faut une certaine interprétation des fiches techniques. En l'occurrence, le symbole utilisé pour les alimentations varie d'une fiche technique à l'autre. Selon les technologies utilisées les tensions d'alimentation

peuvent avoir les symboles V_{cc} , V_{dd} , V_s et les courants consommés par ces tensions d'alimentation les symboles I_{cc} , I_{dd} ou I_s . Ces symboles sont tous équivalents.

4.2. PUISSANCE MOYENNE CONSOMMÉE AVEC UNE EXCITATION NON CONTINUE

Dans la section précédente, nous nous sommes intéressés à la puissance dite *statique* ou *DC*. Il y a souvent aussi une certaine puissance dynamique ou *AC*, qui dépend d'un signal ou de l'état du circuit. Il faut réitérer que l'on recherche la puissance dissipée par le composant pour sélectionner son boîtier et par la suite évaluer la puissance nécessaire du système d'alimentation.

4.2.1. PUISSANCE DYNAMIQUE CONSOMMÉE PAR LES RÉSISTANCES, CONDENSATEURS ET INDUCTANCES

Dans le cas des **résistances**, la puissance moyenne s'évalue par l'estimation de la puissance efficace ou RMS : $P_{RMS} = V_{RMS} I_{RMS}$. Les variantes $P_{RMS} = R I_{RMS}^2$ ou V_{RMS}^2 / R s'appliquent également. La difficulté consiste à évaluer **V_{RMS} et I_{RMS}** car les formes d'ondes peuvent être complexes. Pour trouver la puissance moyenne, il faut s'attarder à la forme de l'onde et, comme il a été mentionné précédemment, calculer la puissance en évaluant la tension RMS ou le courant RMS.

Voici un exemple :

La Figure 22 présente 2 exemples de signaux disponibles à la sortie du 555 et pour lesquels, des puissances dynamiques peuvent être calculées, si cette tension est appliquée aux bornes d'une résistance. Dans le cas du signal du haut, il s'agit de réaliser l'intégrale d'une onde carrée mis au carré tel que présenté dans les exercices de l'APP1, alors que dans le cas du bas, il s'agit de réaliser le calcul d'une double exponentielle mise au carré. Cette dernière (en noir) peut être approximée par des droites proposées (en vert).

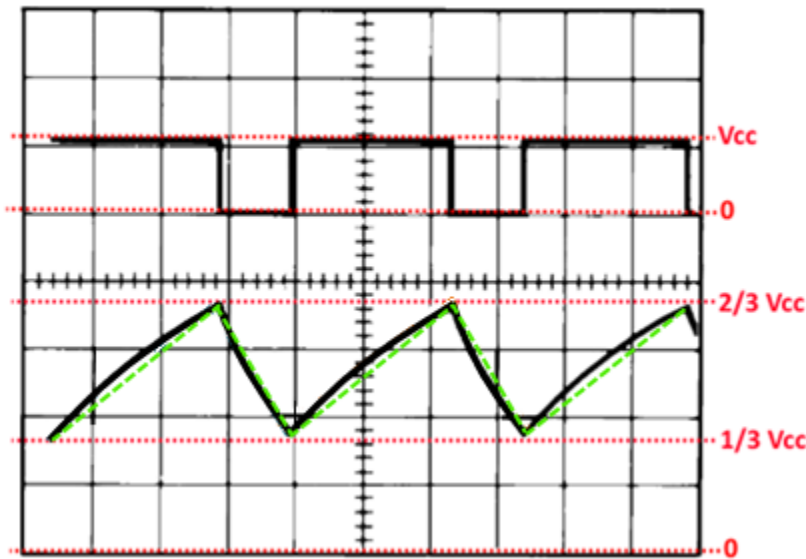


Figure 22. Figure 5 tirée de la spécification technique LM555³.

7

Explication du raisonnement :

Les calculs de l'intégrale de la double exponentielle peuvent s'avérer non triviaux et il est impératif de pouvoir estimer si l'ordre de grandeur de la puissance est exact. On propose 2 approximations successives pour réaliser cette estimation. La première est un calcul de plafonnement de la puissance dynamique en supposant que le composant est excité par une tension continue égale à la plus haute tension AC appliquée sur le composant. Par exemple, si une résistance est excitée par une onde carrée de ± 2 V, on peut déjà savoir que la puissance dynamique dissipée sera nécessairement inférieure à $4^2/R$. Cette pratique calcule une borne supérieure et permet une première validation de la puissance dissipée par un composant. Dans la forme d'onde du haut de la Figure 22, la borne supérieure de puissance dissipée serait V_{cc}^2/R alors que pour la figure du bas, ce serait $(2/3 V_{cc})^2/R$. On peut raffiner l'approximation des exponentielles en les remplaçant par des droites (en vert). À ce moment, le calcul de l'intégrale demeure simple et s'approche du calcul de l'intégrale des exponentielles.

Pour les férus de mathématiques avancées, il est aussi possible de résoudre les doubles exponentielles, mais à un coût en temps et en effort qui ne valent pas souvent la peine. Ce sera votre travail d'ingénieur plus tard d'estimer si ce travail est pertinent. Dans la pratique courante en électronique, on va rapidement borner la puissance dissipée, puis raffiner pour calculer rapidement un estimé assez juste de la puissance dissipée ou encore la vraie puissance dissipée si la forme d'onde est simple puis nous allons nous donner une marge de sécurité. Cela permettra de se donner confiance dans les résultats obtenus. Nous ne nous attendons pas à ce que vous résolviez une double exponentielle pour le calcul de puissance. Une estimation avec marge de sécurité raisonnable est suffisante.

Exemple de signaux du circuit de l'APP :

La Figure 23 montre un exemple de signaux pris sur le circuit réel de l'APP. Les signaux bleu et jaune proviennent des deux sondes d'oscilloscope mises aux bornes de la résistance. Le signal en rouge est la soustraction de la courbe jaune et bleue, il représente la différence de potentiel dans le composant. On vous laisse trouver de quelle résistance il s'agit et comparer vos résultats.

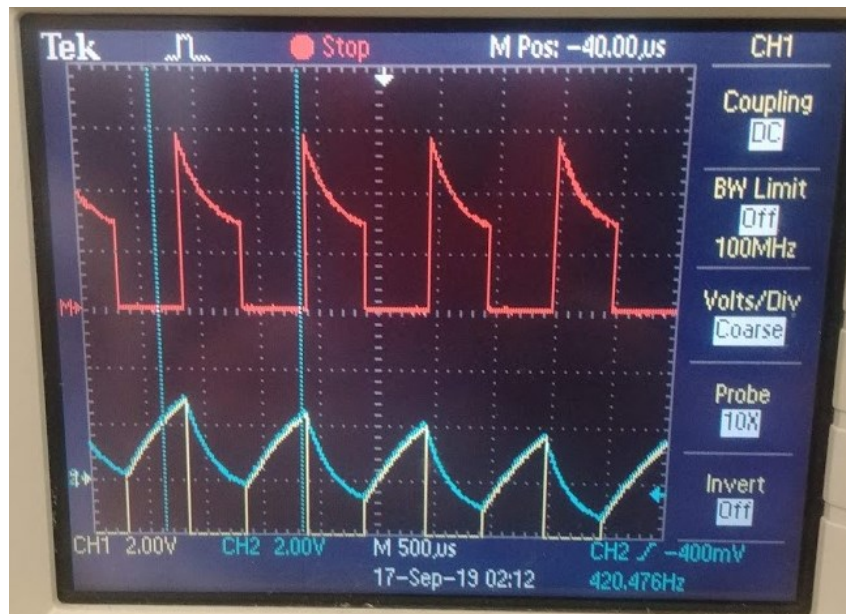


Figure 23 : Signaux réels de différence de potentiel dans une résistance du circuit de l'APP

Vous aurez à mesurer les signaux des différences de potentiels dans chacune des résistances, puis simplifier les signaux mesurés et ensuite calculer la puissance dynamique consommée. Ici, il est possible de simplifier le signal rouge en remplaçant la partie courbe décroissante par une droite.

4.2.2. PUISSANCE MOYENNE CONSOMMÉE PAR LES COMPOSANTS COMPLEXES

L'unique façon d'évaluer la puissance moyenne de **composants complexes est de se référer à la fiche technique.** Quand cette information est disponible, les fabricants la fournissent dans les caractéristiques électriques en fonction de la fréquence d'opération du dispositif. Nous ne disposons pas de cette information dans les fiches techniques et nous allons devoir négliger cette puissance moyenne de nos calculs. Cependant, aux fréquences où nous opérons (c.-à-d. dans l'ordre du kHz), cette consommation est habituellement extrêmement faible. Elle deviendra plus importante lorsque vous utiliserez des circuits opérant à plusieurs dizaines de kHz et très importantes dans les centaines de MHz.

4.3. PUISSANCE TOTALE CONSOMMÉE D'UN CIRCUIT OU D'UN SOUS-CIRCUIT

Cette section regroupe les informations décrites précédemment et s'adresse à votre cas plus spécifique où vous devez évaluer la puissance consommée par **l'étage de circuit d'oscillateur 1 kHz.** Pour ce faire, vous devez calculer **indépendamment la puissance de tous les composants du circuit selon les méthodes décrites précédemment.** **Tel que mentionné, ne tenez pas compte des condensateurs** puisque ceux-ci ne consomment pas de courant comme les pièces actives (circuit intégré) et n'ont pas de pertes significatives en chaleur due au courant qui les traverse comme les résistances, diodes et transistors.

Pour le calcul de la puissance consommée par le 555, vous devez trouver, dans la fiche technique, les informations concernant les tensions et courants d'alimentation. Il se trouve que la tension d'alimentation de 8,3 V n'est pas donnée. Vous devez faire une règle de trois ou un graphique pour trouver la valeur du courant pour l'alimentation de **8,3 V.** Il est à noter que ce travail pourrait être fait en vue de concevoir une source

d'alimentation ou de calculer le temps de fonctionnement sur piles, il est donc préférable de calculer la valeur maximale de puissance (I_{MAX} et V_{MAX}) pour éviter tout problème par la suite. Vous devez aussi calculer la puissance consommée par les autres pièces de cet étage de circuit.

Pour les résistances, la puissance consommée est $P = V^2 / R$. Il faut donc déterminer la valeur de V . La fiche technique du LM555 fournit plus d'explications sur les signaux de chaque patte. La Figure 22 ci-haut présente deux traces : celle du haut étant la sortie (patte 3) et celle du bas, la tension du condensateur (pattes 2 et 6) en fonction du temps. Réalisez les approximations successives décrites précédemment pour assurer des ordres de grandeur. Prendre pour acquis que la patte 8 a une tension de V_{CC} .

Par la suite, vous devez calculer les tensions aux bornes des résistances en soustrayant les tensions à leurs 2 bornes. En occurrence, une des 2 bornes est branchée à V_{CC} et il faut calculer la valeur RMS de V_{CC} moins le tracé de la figure 22 ci-haut. Puisqu'il s'agira de tension variant dans le temps, il faudra calculer les tensions efficaces (V_{RMS}) en calculant l'intégrale exacte ou son approximation à la main. Si vous avez de la difficulté à comprendre quelle est la tension dans chacune des résistances entourant le 555 à partir de sa fiche technique (c.f. figure 22 ci-haut), vous pouvez utiliser l'oscilloscope afin de visualiser le signal qui se trouve à chaque patte de la résistance. N'oubliez pas que la tension dans la résistance est la différence des tensions à ses bornes. Avec deux sondes, on peut placer une sonde de chaque côté de la résistance et utiliser l'opérateur soustraction, ceci vous permettra d'avoir la tension exacte aux bornes de chaque résistance.

Pour la diode Zener, la puissance consommée est $P = V \cdot I$. Puisque les signaux à ses bornes varient en fonction du temps, prendre $P_{RMS} = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$. Prendre les valeurs spécifiées de courant et de tension dans la fiche technique de la diode. Ne pas tenir compte du courant de fuite ou de toutes autres imperfections de la diode.

4.4. MESURE POUR ÉVALUER LA PUISSANCE CONSOMMÉE

L'évaluation de la puissance consommée est extrêmement importante et la prise de mesure nécessite une attention particulière. Ne pas utiliser adéquatement les appareils de mesure et ne pas connaître a priori leurs caractéristiques peut mener à de fausses mesures. Entre autres, il faut faire attention à ce que l'impédanceⁱⁱⁱ de la sonde de l'oscilloscope ne vienne pas perturber le circuit et modifier son comportement. Le type de circuit électronique et les fréquences utilisées dans cet APP ne sont pas critiques. Cependant, pour des mesures optimales, nous allons toujours faire attention de brancher le point de masse de la sonde le plus près possible du point de mesure. Ainsi, vous remarquerez l'existence de plusieurs points de test appelés TP_GND qui serviront lors des mesures. Veuillez aussi noter que l'oscilloscope contribue un certain "bruit de mesure"; vous auriez avantage à connaître l'amplitude de ce bruit (comment la mesurer?) et à vous assurer que ce que vous recherchez est plus grand que le plancher de bruit de l'appareil.

Dans certains cas, il serait important d'évaluer le courant passant dans un composant électronique. Bien qu'il soit facile de mesurer la tension (DC ou AC), il en est autrement pour les courants. On peut alors se servir d'un subterfuge et placer une petite résistance (10 à 30 Ohms) en série avec le composant en supposant que cette

ⁱⁱⁱ Pour les besoins de l'APP1, l'impédance sera considérée comme une simple résistance. En l'occurrence, lorsqu'on mesure un signal avec une sonde d'oscilloscope, on vient mettre une résistance en parallèle (celle de la sonde) avec le générateur d'onde qui lui peut être modélisé par une source parfaite en série avec une autre résistance. Le circuit qui reçoit le signal peut lui aussi être modélisé par une résistance. On se retrouve alors avec un circuit diviseur à 3 résistances où la résistance de la sonde vient modifier le comportement initial générateur d'ondes/circuit électronique, ce qui fausse la mesure.

résistance ne viendra pas perturber le fonctionnement de notre circuit. On peut alors mesurer la tension sur la résistance sachant que le courant y traversant est V/R . Vous allez faire ce montage dans le laboratoire #1.

Pour la résolution de la problématique, on s'intéresse à la puissance du générateur haute fréquence seulement. Afin de faire la mesure, vous devez recopier le circuit du générateur haute fréquence sur une plaquette de montage et mesurer le courant lorsque ce circuit est alimenté à 8,3V.

5. LES FONCTIONS TRANSCENDANTES

La résolution de certaines équations est impossible analytiquement même en fixant des paramètres comme certains condensateurs ou résistances. C'est le cas des fonctions de type

$$y = x \ln(x) \quad \text{Équation 5-1}$$

où il est impossible d'isoler correctement x . La façon d'aborder ce problème est de passer par une approche graphique où l'on dessine indépendamment les fonctions de chaque côté de l'égalité comme suit :

$$y / x = \ln(x) \quad \text{Équation 5-2}$$

Cette approche peut être réalisée dans des logiciels mathématiques comme Matlab, MatCAD ou encore dans des chiffriers comme Excel. Il reste à espérer que les 2 fonctions se recoupent à un endroit comme le démontre la Figure 24.

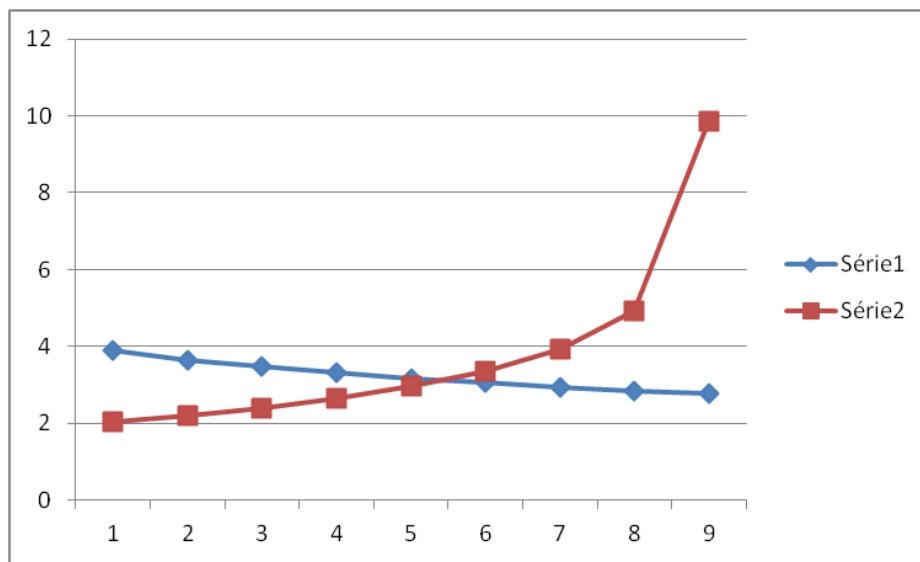


Figure 24. Exemple d'une résolution par une méthode graphique.

6. LE PLAN DE VALIDATION DE CONCEPTION ET LE PLAN DE TEST

6.1. LE PLAN DE VALIDATION DE CONCEPTION

Le plan de validation de conception est tout aussi important que la conception comme telle sinon plus. La création du plan de validation de conception exige des connaissances élargies du domaine dans lequel le développement du produit est effectué. Il est réalisé à partir de spécifications fonctionnelles qui décrivent les différentes fonctions d'un produit qui sont à leur tour traduites en un cahier des charges fonctionnelles [25]. Ce dernier décrit les performances attendues du produit en développement à travers la description de la fonction à rencontrer, son critère d'appréciation (exemple résister à l'eau), le niveau du critère (ex. immersion dans 3 mètres d'eau) et la flexibilité (ex. ± 50 cm). Le cahier des charges fonctionnelles (CdCF) comprend, entre autres, les normes que le produit doit rencontrer (ex. CSA, AFNOR...). Le concepteur utilise le CdCF pour réaliser le produit.

Dans l'APP1, les charges fonctionnelles globales sont plus ou moins décrites et la conception a déjà été réalisée pour vous, ou du moins, en grande partie. Vous n'avez pas à vous soucier de ce CdCF. Cependant, vous devez vous poser la question à savoir **comment atteindre les objectifs visés**. Pour cela, la Figure 1 contient les informations sur les performances attendues de chaque section. Ces informations sont utiles pour réaliser les **tests unitaires**, les tests d'intégration et les tests constituant les tests de validation de la conception.

6.2. PLAN DE TEST VS PLAN DE VALIDATION DE CONCEPTION

Il ne faut pas confondre le plan de test et le plan de validation. Le plan de test sert à **tester le circuit que nous avons sous les yeux**. C'est le genre de test qui est utilisé lors de la production du produit. Pour ce circuit particulier avec ses composants, on identifie quelques points de test et on regarde si les signaux entrent dans les plages attendues. Si c'est le cas, on déclare le circuit fonctionnel. Le plan de validation de conception s'attarde à savoir si le produit répond aux besoins attendus par le client. C'est un travail d'ingénieur de planifier l'ensemble des tests à réaliser et ces tests sont beaucoup plus exhaustifs que des tests unitaires ou d'intégration où on test 2 ou plusieurs circuits en cascade. On peut prendre un exemple d'un GPS pour mieux distinguer les 2 plans.

Un plan de **test** est utilisé dans la ligne d'assemblage d'électronique où on assemble le GPS avant la vente. Un test unitaire serait de mesurer la valeur des résistances individuellement. Un test fonctionnel pourrait être de vérifier par une mesure si l'agencement de résistances avec un amplificateur opérationnel donne un gain de 10. On injecte un signal à l'entrée du circuit et on regarde à sa sortie si on a effectivement un gain de 10. Finalement, on peut effectuer un test d'intégration pour savoir si la batterie permet d'allumer l'écran et démarrer le processeur. Un test système permettrait de prendre une mesure de la position de l'usine pour voir si le GPS fonctionne avant de le mettre sur le marché. Bien que le GPS doit fonctionner à des températures inférieures à -20°C , les tests seront réalisés avec des conditions d'opération normale et ainsi testé à la température de la pièce. Le plan de test dicte alors quelques cas à tester pour voir si le produit sortant de la production fonctionne bien mais ne s'intéresse pas aux conditions particulières que le produit doit subir.

Le plan de validation de conception du GPS vérifie si le produit correspond aux requis du client. Il est utilisé à chaque étape de conception et se compose d'une série de tests unitaires et d'intégration qui permettraient de valider la fonctionnalité de chacun des modules indépendamment pour toutes les conditions que pourrait subir ce module. Par exemple, le produit est réputé fonctionner à des températures variant entre -70 à $+125^{\circ}\text{C}$, il doit avoir une autonomie de 2 jours avec une pile de 100 mAh et doit avoir un poids de moins de 200 g. Il doit pouvoir

supporter des décharges électrostatiques de 2 000 V. Le plan de validation de la conception doit vérifier le fonctionnement du circuit pour toutes ces conditions réunies. Cela signifie une quantité de test exorbitante et il **est nécessaire de bien planifier les tests à réaliser.**

Il est à noter qu'habituellement le plan de validation de conception contient une grande majorité des éléments du plan de test de production mais avec des conditions de test différentes. En électronique, les conditions les plus usuellement rencontrées et susceptibles de faire changer les performances de notre circuit sont les variations en température, la plage possible des alimentations en entrée, la susceptibilité au bruit (alimentations et électromagnétique), l'émission électromagnétique du circuit, la résistance aux vibrations, la fiabilité à long terme du circuit et de son assemblage, et certainement toutes les normes à rencontrer (CSA, AFNOR, FDA, Santé Canada, Marquage CE, FCC, etc, etc, et encore, etc). Lorsque vous **devez rencontrer des normes**, il est obligatoire de le démontrer avec **un test approprié. Ce test fera partie du plan de validation.**

Dans le cas de l'APP1, vous allez vous concentrer **sur les tests au niveau au niveau électrique.** On vous demande de réaliser le plan de test pour chacun des modules (**tests unitaires et test d'intégration**) en conditions normales d'opération, i.e. avec votre oscillateur haute fréquence en marche qui alimente les autres circuits subséquents un peu à la manière des tests de production. Vous devez consigner ces résultats dans votre cahier de laboratoire car cette pratique est obligatoire en industrie pour obtenir les crédits de recherche scientifique et de développement expérimental. Autant vous pratiquer immédiatement ! Par la suite, vous allez développer le plan de validation de la conception selon ce qui est mentionné dans le guide étudiant. Pour simplifier la batterie de test, considérer les 3 circuits avant TP4 (gain unitaire, intégrateur et filtre passe-bas) ensembles, faire de même pour les 2 circuits avant TP7 (Interrupteur et ampli audio). Il n'est donc pas nécessaire de mesurer les intermédiaires (TP2, TP3 et TP6). Il faut alors injecter, à l'endroit approprié, les signaux désirés selon les spécifications du client (voir figure 1 de l'annexe). Il ne faut pas non plus oublier que l'alimentation doit être tolérante à une plage d'utilisation. Pour chacun des cas à tester, il faut réaliser un test et vérifier la réponse. Le plan de validation consiste à répertorier ces conditions dans un tableau. Notez qu'un test électrique peut nécessiter de répéter plusieurs fois le même test avec différentes conditions d'opération (amplitude minimum et maximum, fréquence minimum et maximum, température, etc.). À titre d'exemple, si un circuit est spécifié pour fonctionner de 1 V à 5 V et de 100 Hz à 3 kHz, il faut injecter les 4 cas possibles de signaux (1 V et 100 Hz, 1 V et 3 kHz, 5 V et 100 Hz et finalement 5 V et 3 kHz). Idéalement, on testerait un peu au-delà de chacun des maxima et minima.

Normalement, pour une validation complète il faudrait faire des tests pour couvrir les variations statistiques de chacune des composants électroniques (c.-à-d. leur précision). C'est un test impossible à réaliser et nous allons préférer réaliser une simulation de type *Monte-Carlo* qui effectue des simulations avec toutes les valeurs minimum et maximum des résistances et condensateurs pour nous assurer que le circuit fonctionne dans toutes les conditions. Nous n'allons pas aborder ce sujet dans l'APP et nous allons nous contenter de simples mesures à TP4.

À titre d'exemple, vous retrouverez au Tableau 2 le plan de test pour la mise sous tension du circuit avec vérification à quelques points de test. Au bout de chaque ligne de test, un carré à cocher permet de savoir si le test a été réalisé et satisfait le critère ou pas. Des images synoptiques (même réalisées à la main) du test à réaliser facilitent la compréhension. Des plans de tests plus élaborés seront abordés plus tard dans votre baccalauréat.

Tableau 4. Exemple de plan de test.

Nom de la fonction à valider	Entrée	Résultat attendu	Test complété avec succès	Explication des modifications apportées pour que le circuit fonctionne
Circuit d'alimentation	Ouvrir la source de tension	Connecteur P1 : -9 V, 0 V et 9 V	Y OUI Y NON	Pas les bonnes tensions → Vérifier le fil entre la masse et la borne + ou – sur la source de tension.
Oscillateur haute-fréquence	Alimentation positive entre 8 V et 9 V selon le courant tiré dans D1	TP1 : Onde carrée 1 kHz de 0 à 5,1 V 50 % de rapport cyclique	Y OUI Y NON	Le signal est de 0 V → ajuster R17
Signal de sortie	Alimentation positive entre 8 V et 9 V selon le courant tiré dans D1 Alimentation négative entre -8 V et -9 V selon le courant tiré dans D2	TP7 : Sinusoïdale de 1 kHz de -3 V à 3 V modulée par une onde carrée à 0,5 50 % ± 5% de rapport cyclique	Y OUI Y NON	Tension mauvaise → ajuster R16 Fréquence 1 kHz → ajuster R17

Le Tableau 5 présente un exemple d'un plan de validation électrique pour les diodes de protection et le circuit oscillateur haute fréquence. Comme nous nous préoccupons seulement de la validation électrique sans tenir compte des variations statistiques des valeurs de résistances et condensateurs, il faut regarder les paramètres pour lesquels le 555 pourrait voir varier sa fréquence à sa sortie. Le 555 ne possède pas d'entrée proprement dite, mais il est alimenté par une source $\pm 8,3$ V précise à $\pm 10\%$ et à sa sortie, nous avons un circuit suiveur dont l'impédance (c.-à-d. résistance) à l'entrée est extrêmement élevée (> 10 MOhms). Le plan consisterait à

- 1) Pour les diodes de protection -> alimenter le circuit en inverse (c.-à-d. inverser le + 9 V avec le – 9 V et vérifier si les diodes tiennent la tension. Attention il n'est pas conseillé de faire ce test pour de vrai, en cas de défaillance les dégâts seront irréparables. Vous pourrez l'essayer sur un circuit qui contiendrait seulement les diodes.
- 2) Pour l'oscillateur haute fréquence, alimenter le circuit de façon normale et faire varier les alimentations de $\pm 10\%$ et vérifier le fonctionnement de la sortie.
- 3) Pour chacun des cas précédents mettre un potentiomètre de 10 MOhms à TP1 et faire varier le potentiomètre entre 9 et 10 MOhms^{iv}.

Votre travail consiste à trouver et réaliser un travail similaire permettant de valider les étages entre J1 et TP4.

^{iv} Note importante, cette mesure est difficile à réaliser, car une sonde d'oscilloscope contient déjà une résistance parasite de 10 MOhms lorsqu'en x10. Si vous mettez votre sonde en parallèle avec ce potentiomètre de 10 MOhms, vous avez une résistance équivalente de 5 MOhms. Cela pourrait fausser vos mesures !!!

Tableau 5. Exemple de plan de validation.

Nom du test	Conditions du test	Résultat attendu	Test complété avec succès	Explication des modifications apportées pour que le circuit fonctionne
Circuit d'alimentation	Les polarités des alimentations +9 V et -9 V comme prévu	Connecteur P1 : -9 V, 0 V et 9 V	Y OUI Y NON	Si pas les bonnes tensions → Vérifier le fil entre la masse et la borne + ou – sur la source de tension.
Circuit de protection des alimentations	Les polarités des alimentations +9 V et -9 V sont inversées	Connecteur P1 : 0 V, 0 V et 0 V	Y OUI Y NON	Si signal → Les diodes sont inversées
Oscillateur haute-fréquence	Alimentation positive à 9,9 V et négative à -9,9 V, Charge de 10 MOhms sur TP1	TP1 : Onde carrée 1 kHz de 0 à 5,1 V 50 % de rapport cyclique	Y OUI Y NON	
Oscillateur haute-fréquence	Alimentation positive à 8,1 V et négative à -9,9 V, Charge de 10 MOhms sur TP1	TP1 : Onde carrée 1 kHz de 0 à 5,1 V 50 % de rapport cyclique	Y OUI Y NON	
Oscillateur haute-fréquence	Alimentation positive à 8,1 V et négative à -8,1 V, Charge de 10 MOhms sur TP1	TP1 : Onde carrée 1 kHz de 0 à 5,1 V 50 % de rapport cyclique	Y OUI Y NON	
Oscillateur haute-fréquence	Alimentation positive à 9,9 V et négative à -8,1 V, Charge de 10 MOhms sur TP1	TP1 : Onde carrée 1 kHz de 0 à 5,1 V 50 % de rapport cyclique	Y OUI Y NON	
Oscillateur haute-fréquence	Alimentation positive à 9,9 V et négative à -9,9 V, Charge de 9 MOhms sur TP1	TP1 : Onde carrée 1 kHz de 0 à 5,1 V 50 % de rapport cyclique	Y OUI Y NON	
Oscillateur haute-fréquence	Alimentation positive à 8,1 V et négative à -9,9 V, Charge de 9 MOhms sur TP1	TP1 : Onde carrée 1 kHz de 0 à 5,1 V 50 % de rapport cyclique	Y OUI Y NON	
Oscillateur haute-fréquence	Alimentation positive à 8,1 V et négative à -8,1 V, Charge de 9 MOhms sur TP1	TP1 : Onde carrée 1 kHz de 0 à 5,1 V 50 % de rapport cyclique	Y OUI Y NON	
Oscillateur haute-fréquence	Alimentation positive à 9,9 V et négative à -8,1 V, Charge de 9 MOhms sur TP1	TP1 : Onde carrée 1 kHz de 0 à 5,1 V 50 % de rapport cyclique	Y OUI Y NON	

7. RÉFÉRENCES

- [1] R. Fontaine, Guide étudiant, Avertisseur sonore de marche arrière, 2018, 24 p.
- [2] <https://www.ebay.fr/itm/0603-5-Carte-Resistance-Montage-En-Surface-Bobines-5000-12K-pour-10M-/122744569558>
- [3] <https://www.canstockphoto.ca/fragment-of-electronic-board-with-chip-43154368.html>
- [4] <http://www.maxicours.com/se/fiche/5/2/131352.html>
- [5] <http://www.conrad.fr/>
- [6] <http://boutique.semageek.com>
- [7] http://www.molex.com/catalog/web_catalog/pdfs/C.pdf
- [8] wiki.t-o-f.info
- [9] computers-maintenance.blogspot.com
- [10] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiom%C3%A8tre>
- [11] http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Caract%C3%A9ristique_id%C3%A9ale_Diode_Zener.PNG
- [12] http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Zener_diode_voltage_regulator.svg
- [13] Lumex, SSL-LX5093LID, 1p.
- [14] Texas instrument, NE555, SA555, SE555, Precision timers, SLFS022E – SEPTEMBER 1973 – REVISED MARCH 2004, 24 p.
- [15] National semiconductor, LM555 timer, juillet 2006, 12 p.
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Dual_in-line_package
- [17] <http://www.evelta.com/>
- [18] http://fr.wikipedia.org/wiki/Dual_Inline_Package
- [19] https://solarbotics.com/product/dc-16_pin/
- [20] <https://www.fabriqueurs.com/simon/>
- [21] Texas instrument, LF444 Quad Low Power JFET Input Operational Amplifier, Literature Number: SNOSC04C août 2000, 14 p.
- [22] Good-ark, 1N4728 THRU 1N4764 Silicon planar power zener diodes, 3 p.
- [23] Vishay siliconix, DG417, DG418, DG419, Precision CMOS analog switches, Document Number: 70051, 2010, 16 p.
- [24] Texas instrument, LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier, Literature Number: SNAS545A, Aout 2010, 11 p.
- [25] TASSINARI, *Pratique de l'analyse fonctionnelle*, Dunod, 4^{ème} édition, 2006, 208 p.