INSTRUMENTATION INTELLIGENTE D'UN ATELIER

MANUEL DE CONCEPTION

001 CONCEPT MAN A1

Polytech Lille
Avenue Paul Langevin – 59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX - FRANCE
Tél : 33 (0)3 28 76 73 00
www.polytech-lille.fr

REVISION

VERSION	PAGES	CHAPITRE	OBJET DE LA REVISION
A0	49	7	Création
A1	89	6	Redécoupage du plan et de ses sous parties Ajout du chapitre *III.2.6 Troisième version*
B			
C			
D			
E			

VALIDATION

VERSION	DATE	REDACTEUR	VERIFICATEUR	CONTROLE QUALITE	APPROBATEUR
		Nom Visa	Nom Visa	Nom Visa	Nom Visa
A	26/06/20	N. HAVARD	F. CHEVALIER		
B					
C					
D					
E					

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

SOMMAIRE

I INTRODUCTION 4
I.1 DOMAINE D'APPLICATION 6
I.2 DOCUMENTS APPLICABLES 6
I.3 DOCUMENTS CITES EN REFERENCE 6
II SPECIFICATIONS 7
II.1 FONCTIONNELLES 7
II.2 TECHNIQUES 7
II.3 BUDGETAIRES 7
II.4 DELAIS 8
III CREATION DES CARTES ELECTRONIQUES 9
III.1 CARTES "AFFICHEURS" 9
III.1.1 Eléments techniques 9
III.1.2 Liste des composants 10
III.1.3 Réalisations 11
III.2 CARTE "PRINCIPALE" 13
III.2.1 Récupération des tensions 13
III.2.2 Pilotage des cartes "afficheurs" 18
III.2.3 Envoi des données sur le réseau 20
III.2.4 Traitement des informations faisant le lien entre les trois blocs précédemment traités 22
III.2.5 Création du PCB 24
III.2.6 Troisième version 32
III.3 INSTALLATION DU SERVEUR ET PROGRAMMATION DE L'APPLICATION 70
III.4 PROGRAMMATION DE LA CARTE "*PRINCIPALE*" 76
III.4.1 Récupération des données 77
III.4.2 Affichage des données sur les cartes "*afficheurs*" 79
III.4.3 Envoi des données sur le serveur 83
IV RESULTATS 85
V AMELIORATIONS POSSIBLES DU PROJET 86
VI REFERENCES 87

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

I INTRODUCTION

Lors des travaux pratiques d'électrotechnique, les élèves ingénieurs de Polytech suivant la formation Informatique, Microélectronique et Automatique ont pu observer un problème technique se propageant dans la salle : l'extinction des afficheurs permettant la lecture de la tension qu'ils règlent pour alimenter divers appareils tels que des machines industrielles.

Cette extinction est due à l'utilisation d'un circuit non isolé du circuit de puissance et donc sensible aux appels de courant, détruisant par conséquent le circuit.

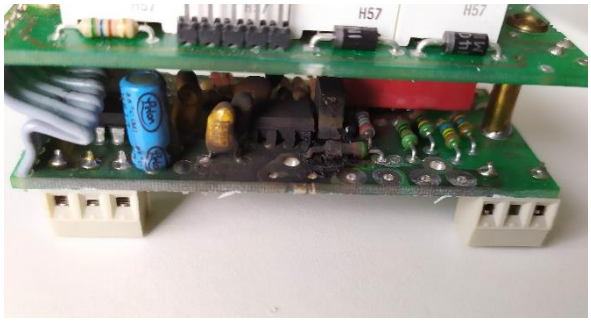


Photo d'un des anciens afficheurs ayant été détruit

Afin de résoudre ce problème, M. CHEVALIER a donc demandé à un de ces étudiants de fournir une solution durable dans le cadre de son PFE, afin d'assurer la possibilité de ses successeurs de participer à ces travaux pratiques. De plus, ce projet permettra de connecter ces afficheurs à l'ordinateur du superviseur de ces travaux pratiques afin de surveiller les tensions en sortie des générateurs depuis son bureau. La disposition du matériel est donc la suivante :

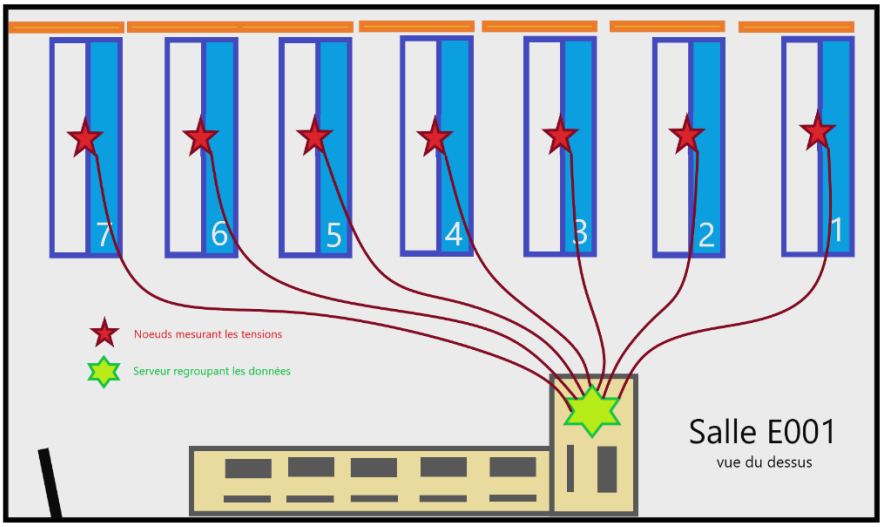


Schéma de la salle E001 et positionnement des cartes électroniques à concevoir, reliées au serveur par l'intermédiaire d'un switch

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Les objectifs de ce projet s'articulent autour des trois points suivants :

- L'objectif principal de ce projet est de remplacer les actuels afficheurs des bancs de tests de la salle E001 par une solution isolée du circuit de puissance afin d'éviter la destruction du matériel.

- Le projet devra ensuite répondre au besoin d'une surveillance centralisée sur l'écran de l'encadrant permettant la visualisation des tensions aux bornes des sources de chaque banc de tests.

- Le dernier objectif est la rédaction d'un protocole de sécurité permettant d'informer les futurs opérateurs de la bonne utilisation de ce nouveau matériel.

Afin d'expliquer la réalisation de ce projet, nous allons découper ce compte rendu en trois parties qui sont la création des cartes électroniques, la programmation des nœuds de capteurs et l'installation d'un serveur afin d'afficher les données centralisées.

Chaque partie détaillera les choix techniques réalisés en mettant en lumière les parties du cahier des charges motivant ces choix.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

I.1 DOMAINE D'APPLICATION

Ce document s'applique au projet « *Instrumentation intelligente d'un atelier* ».

I.2 DOCUMENTS APPLICABLES

N°	REFERENCE	REVISION	TITRE

I.3 DOCUMENTS CITES EN REFERENCE

N°	REFERENCE	TITRE
[]	001 CONCEPT MAN A0	Rapport de conception
[]		
[]		

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

II SPECIFICATIONS

En début de projet, un certain nombre de points ont été abordé : ceux-ci précisent aussi bien les attentes du projet que les moyens mis à disposition pour sa réussite.

II.1 FONCTIONNELLES

Le projet consistera à mettre au point un appareil présent dans chacun des bancs de travaux pratiques de la salle E001 afin de mesurer la tension présente aux bornes des trois sources de tensions variables.

La solution devra permettre l'affichage des tensions sur le banc de travaux pratiques via des afficheurs 7 segments placés aux emplacements dédiés, qui sont ceux utilisés aujourd'hui. Ces emplacements sont au nombre de trois : celui à gauche du tableau de bord permet d'afficher la tension du générateur de tension continue isolé des deux autres, qui se trouvent à droite du banc.

Enfin, la solution ne devra nécessiter aucune maintenance quelconque, qu'elle soit logicielle ou matérielle. Il est ainsi demandé de ne pas utiliser de batteries pour alimenter le module.

II.2 TECHNIQUES

Les sources sont constituées d'un générateur de tension variable triphasée pouvant atteindre 400 VAC efficace lié à une source de tension continue allant jusqu'à 250 VDC, un interrupteur permettant de passer de l'un à l'autre. La troisième source est un autre générateur de tension continue atteignant 250 VDC, indépendant des deux autres sources.

Contrairement au système utilisé jusqu'alors, le projet devra permettre la mise en place d'une solution assurant l'isolation galvanique entre le circuit de puissance et le circuit de mesures afin d'assurer la pérennité de celle-ci. La précision des mesures, elles, devront être de ±2 V environ.

La carte de mesures sera alimentée par une alimentation 12 VDC, présente sur chacune des paillasses. Elle aura aussi à sa disposition un câble Ethernet relié au PC central de la salle E001 afin d'y envoyer les données mesurées pour les afficher sur un écran à disposition de l'encadrant du TP.

II.3 BUDGETAIRES

Pour réaliser ce projet, il a été demandé d'apporter une solution au problème en limitant le plus possible le coût de cette dernière. Cependant, aucune contrainte budgétaire précise n'a été imposée.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

II.4 DELAIS

Le projet a initialement débuté le 15 septembre 2019 et un rendu a été attendu pour le 17 décembre 2020, soit une période de 3 mois. A la suite de ce rendu, une période d'un mois et demi a été décidée en parallèle d'une activité professionnelle entre le 7 mai et le 27 juin 2020 pour proposer une nouvelle solution à un problème rencontré lors de la première période et pour fournir de nouveaux documents précisant l'installation et l'utilisation du matériel.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III CREATION DES CARTES ELECTRONIQUES

Ce projet ayant une partie conception électronique importante, il a rapidement fallu déterminer les composants qui allaient être utilisés dans le cadre de ce projet, mais aussi comment ces cartes allaient intégrer les bancs de travaux pratiques.

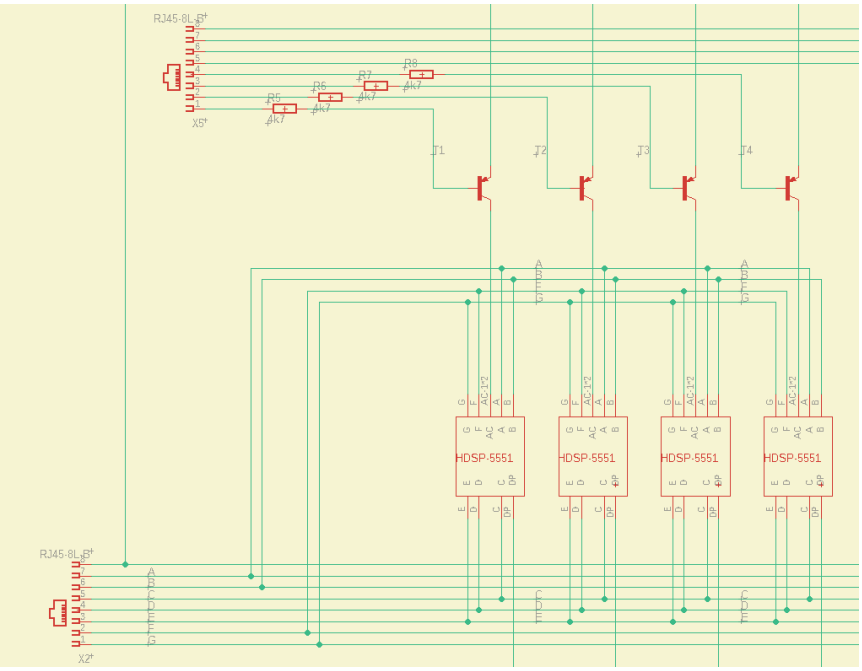
Afin de remplacer les afficheurs déjà présents sur les bancs, il a été nécessaire de créer trois cartes “*afficheurs*” qui se logeront aux emplacements des cartes actuelles. Disposant d’une intelligence sur chaque banc de TP, une carte “*principale*” récupérant les tensions et traitant ces valeurs a été décidée. Elle communiquera donc avec les cartes “*afficheurs*" et le réseau Ethernet de la salle. Elle sera donc placée à distance des cartes *“afficheurs*", au centre du banc de TP.

III.1 CARTES “AFFICHEURS"

III.1.1 ELEMENTS TECHNIQUES

Comme stipulé dans le cahier des charges, ces cartes doivent remplacer les afficheurs actuellement présents sur les bancs de TP et doivent donc montrer des caractéristiques similaires. Ainsi, il a été choisi d’utiliser 4 afficheurs 7 segments de couleur rouge par carte. Celles-ci dépendant des informations transmises par la carte “*principale*", des câbles Ethernet permettront la transmission des informations avec cette dernière. Des connecteurs RJ45 ont été choisi afin de brancher plus facilement les cartes entre elles.

Chaque carte disposera donc de 4 afficheurs 7 segments à anode commune pilotés par des transistors PNP. La commande de ces transistors proviendra du driver de LEDs MM5451 permettant un multiplexage des afficheurs et évitant donc d’utiliser deux fois plus de connecteurs RJ45 et donc deux fois plus de câbles.



Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Schema du multiplexage des afficheurs 7 segments :
En bas se trouvent les signaux permettant d'allumer les segments tandis qu'en haut se trouve la commande choisissant quel afficheur va être alimenté

Afin de limiter le nombre de connecteurs RJ45 sur la carte "*principale*", les deux cartes "*afficheurs*" à droite du banc de TP se partageront les informations. En effet, les câbles Ethernet disposent de 8 fils, et le choix de l'afficheur 7 segments à piloter ne demande que 4 fils par carte (4 digits par carte "*afficheurs*", un fil par digit). Nous profitons donc des 4 fils restant pour piloter les 4 digits de la carte suivante. Les informations sur les segments à allumer sont donc transportées par le même câble que pour la carte précédente, et il suffit simplement de prolonger ce câble à la dernière carte comme suit :

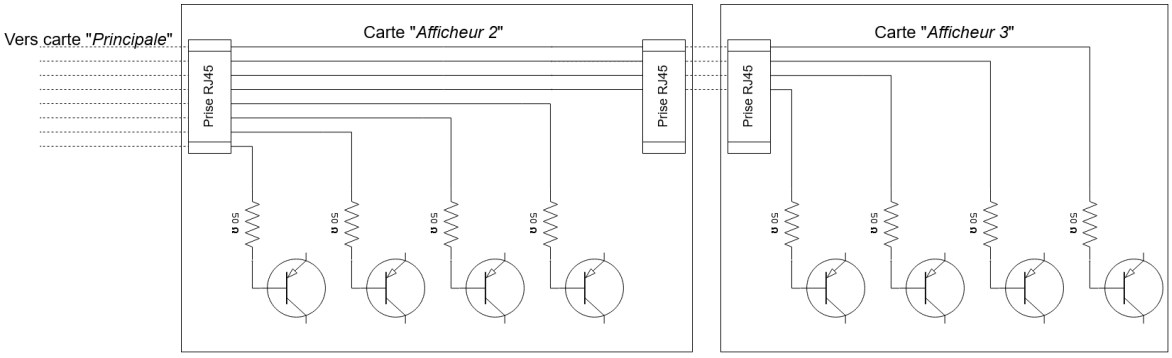


Schéma du partage du câble Ethernet entre l'afficheur central et celui de droite

Ces choix permettent donc d'économiser la place de deux connecteurs RJ45 sur la carte "*principale*" et du câble à conditions de modifier le code gérant ces afficheurs, le système se rapprochant alors d'un afficheur 4 digits à gauche du banc et d'un afficheur 8 digits à droite de celui-ci, tel que montré sur le schéma suivant :

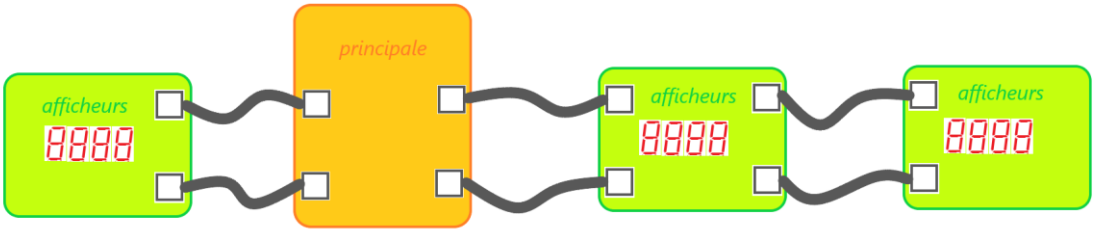


Schéma de la disposition des cartes sur le banc

III.1.2 LISTE DES COMPOSANTS

Concernant les composants, chacune des trois cartes portera les composants suivants :

Description	Nombre	Référence	Prix / unité
Afficheur 7 segments à anode commune	4	HDSP-5551 de Broadcom	2€09
Transistor PNP	4	2DB1689-7 de DIODES INC.	0€223
Résistance 4k7	4	MCWR08X4701FTL de MULTICOMP Pro	0€0078

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Prise RJ45	2	54601-908WPLF de AMPHENOL ICC	0€356
TOTAL			**9€9952**

Tableau des composants pour la carte "afficheurs" n°1

Description	Nombre	Référence	Prix / unité
Afficheur 7 segments à anode commune	4	HDSP-5551 de Broadcom	2€09
Transistor PNP	4	2DB1689-7 de DIODES INC.	0€223
Résistance 4k7	4	MCWR08X4701FTL de MULTICOMP Pro	0€0078
Prise RJ45	4	54601-908WPLF de AMPHENOL ICC	0€356
TOTAL			**10€7072**

Tableau des composants pour la carte "afficheurs" n°2

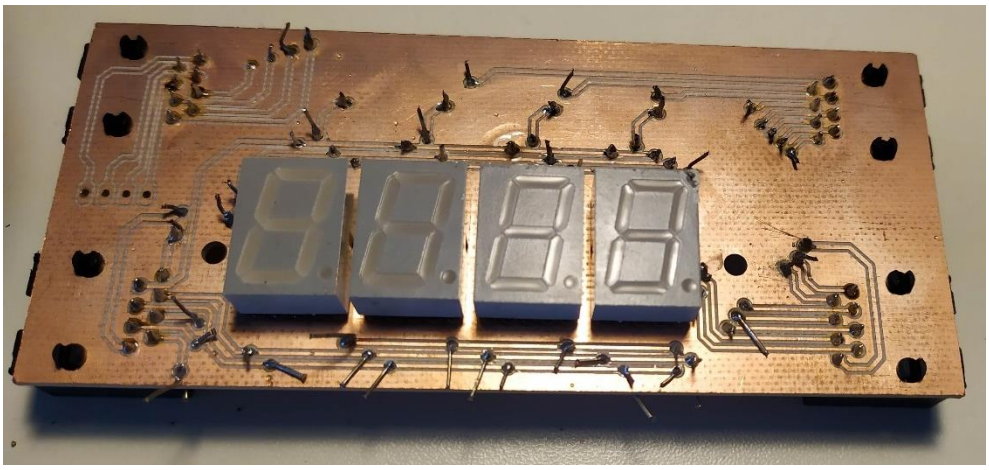
Description	Nombre	Référence	Prix / unité
Afficheur 7 segments à anode commune	4	HDSP-5551 de Broadcom	2€09
Transistor PNP	4	2DB1689-7 de DIODES INC.	0€223
Résistance 4k7	4	MCWR08X4701FTL de MULTICOMP Pro	0€0078
Prise RJ45	2	54601-908WPLF de AMPHENOL ICC	0€356
TOTAL			**9€9952**

Tableau des composants pour la carte "afficheurs" n°3

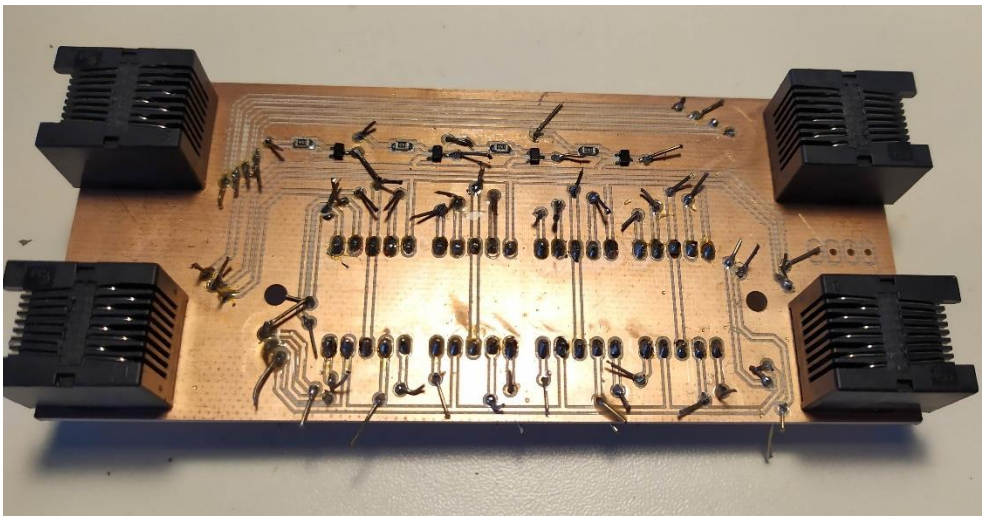
III.1.3 REALISATIONS

Une fois la liste des composants décidée, nous avons pu passer à la création du schematic de chacune des cartes "*afficheurs*". Puis nous sommes passés au routage de ces trois cartes. Une fois le routage terminé, nous avons pu imprimer les cartes et les souder avant de vérifier les éventuels courts-circuits. Un exemple du résultat est le suivant :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



Bot du circuit « afficheur 2 »



Top du circuit « afficheur 2 »

A des fins de tests, nous avons placé une tension de 5 VDC entre les pins 5V et GND reliant donc l'émetteur des transistors et la cathode des afficheurs 7 segments respectivement, avant de placer une tension de piloter les différents transistors en connectant la base de chaque transistor au 5V : les segments des afficheurs s'allument séparément comme espéré.

Nous pouvons donc déduire de ces tests que les cartes afficheurs sont opérationnelles et permettront d'afficher correctement la tension aux bornes des trois sources de tension du banc comme indiqué dans le cahier des charges.

Après avoir expliqué la création des trois cartes "*afficheurs*", passons à la carte "*principale*".

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.2 CARTE "PRINCIPALE"

Le but de cette carte est de récupérer les tensions aux bornes des générateurs, de traiter ces informations avant de les renvoyer sur le réseau Ethernet mais aussi de piloter les cartes "*afficheurs*" afin qu'elles affichent les tensions mesurées pour chaque source. Quatre blocs se distinguent donc sur cette carte :

- Récupération des tensions
- Pilotage des cartes "*afficheurs*"
- Envoi des données sur le réseau
- Traitement des informations faisant le lien entre les trois blocs précédemment cités

III.2.1 RECUPERATION DES TENSIONS

III.2.1.1 JUSTIFICATION DES SOLUTIONS RETENUES

L'objectif de ce projet étant de mesurer la tension présente aux bornes des différentes sources de tension des bancs de travaux pratiques, un des exigences principales a été de prévoir un circuit électronique permettant d'avoir une image fiable de ces valeurs.

Les tensions fournies par les sources pouvant atteindre 250 VDC ou 400 VAC, il est nécessaire de baisser cette tension à 5 VDC pour la lire à l'aide d'un microcontrôleur. Dans les cas où la tension à mesurer est continue, nous utilisons tout simplement un pont diviseur de tension pour obtenir une image de la tension en entrée comprise entre 0 et 5 VDC. Pour le générateur de tension alternative, nous utilisons un pont de diodes puis une capacité de filtrage afin de redresser le signal.

Afin d'assurer une meilleure précision lors de la mesure, il a été proposé d'utiliser plusieurs canaux de mesures en multipliant les ponts diviseurs de tension qui seront automatiquement activés par le microcontrôleur en fonction de la mesure actuelle de la tension. Afin de respecter le cahier des charges stipulant d'assurer l'isolation galvanique entre le circuit de puissance et le circuit de commande, nous avons choisi d'utiliser des relais pour piloter ces différents canaux de mesures étant donné que l'utilisation de transistors n'assure aucune isolation entre les deux circuits.

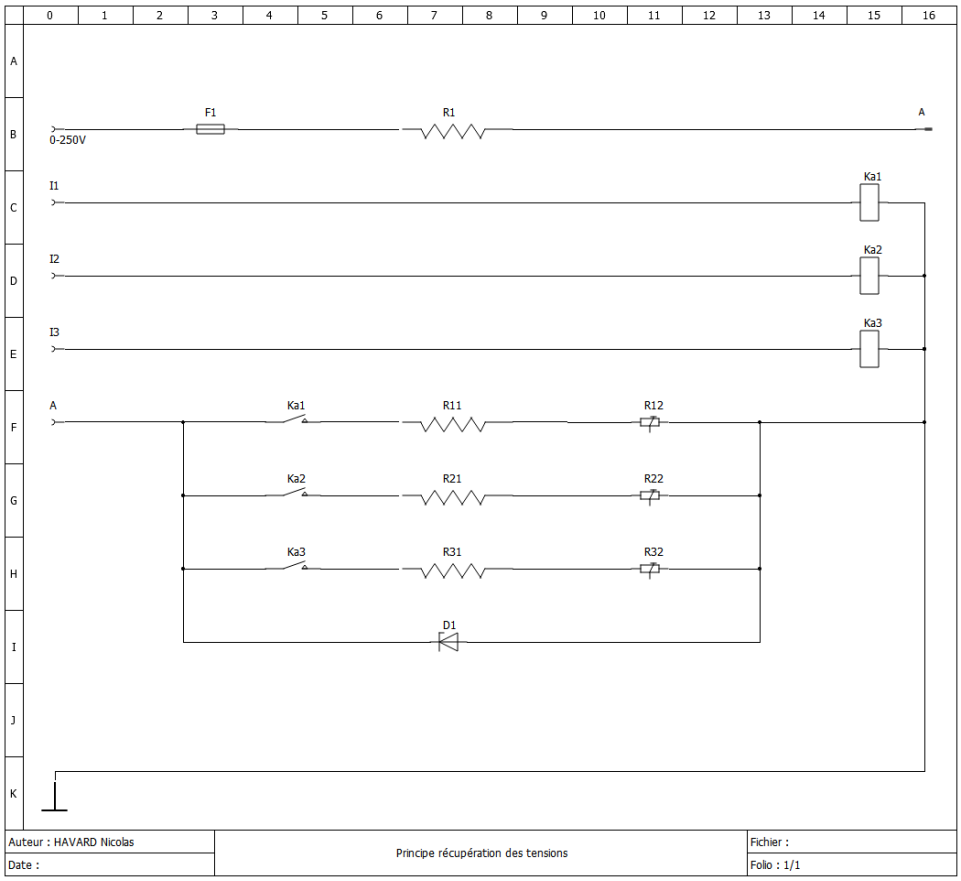
Le nombre de canaux par mesure a été déterminé à 3, soit une utilisation de 9 relais pilotés par le microcontrôleur pour garantir davantage de précision sur la mesure, et donc un même nombre de sorties numériques utilisées. Afin de limiter ce nombre, nous avons choisi d'utiliser des démultiplexeurs 2 vers 4 MC74ACT139 de On Semiconductor afin de gagner quelques sorties numériques sur le microcontrôleur. Ainsi, la gestion des relais pour les canaux de mesures n'a besoin que de 6 sorties au lieu des 9 qui auraient été nécessaires sans l'utilisation de ces démultiplexeurs.

Une fois que nous obtenons une image des mesures, il est nécessaire d'envoyer cette tension sur l'une des entrées analogiques de notre microcontrôleur. Afin d'assurer l'isolation galvanique entre le circuit de mesures et le microcontrôleur, nous utilisons un amplificateur d'isolation qui permet de transmettre un signal entre deux circuits tout en permettant l'isolation galvanique grâce à un optocoupleur. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser l'ACPL-C87B d'Avago qui demande de diminuer le signal en entrée entre 0 et 2 VDC. Ce module nécessite une tension d'alimentation comprise entre 4,5 et 5,5 VDC du côté du circuit de mesures et une tension d'alimentation entre 3 et 5,5 VDC de l'autre côté pour la sortie.

Si l'ACPL-C87B ne récupère le signal à transmettre que sur une seule entrée, il le transmet grâce à deux signaux dont la différence des potentiels est égale à la tension en entrée du module. L'ACPL-C87B nécessite donc l'utilisation d'un amplificateur opérationnel pour soustraire les deux signaux à sa

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

sortie avant d'envoyer l'information sur une entrée du convertisseur analogique vers numérique du microcontrôleur, nous choisissons d'utiliser un OPA237 de Ti et profitons de ce montage différentiel pour choisir des résistances adaptées et amplifier la tension de 2 à 5 VDC maximum, soit un gain de 2,5 en sortie de l'amplificateur opérationnel.



Circuit du principe permettant de récupérer la tension

Sur le circuit ci-dessus, nous traitons le cas où la source de tension est une source de tension continue. Délivrant une tension pouvant atteindre les 250 VDC, celle-ci est abaissée à environ 2 V grâce aux différents ponts diviseurs de tension fermés avec les contacts des relais Ka1, Ka2 et Ka3 pilotés respectivement par les entrées I1, I2 et I3.

Concernant les ponts diviseurs de tension, il a donc fallu diminuer la tension maximale de chaque canal de mesures pour qu'elle ne dépasse pas 2 V. De plus, afin de diminuer la tension aux bornes de chaque résistance et ainsi limiter le claquage de ces dernières, nous multiplions les résistances de plus faibles valeurs que nous mettons en série : plutôt que de n'avoir qu'une seule résistance R1 de 1,25 MΩ qui aurait une tension à ses bornes pouvant atteindre 250 VDC, nous utilisons 5 résistances de 249 kΩ qui auront alors une tension maximale de 50 VDC à leurs bornes.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

TABLEAU DU CALCUL DES RESISTANCES

	Source de tension continue			Source de tension alternative		
Tension max (V)	250	150	50	500	150	50
Tension min (V)	150	50	0	150	50	10
ratio 2V/Input	0,008	0,01333	0,04	0,004	0,01333	0,04
Précision (V)	1,53	0,92	0,31	3,05	0,92	0,31
Précision (%)	1%	1%	1%	1%	1%	1%
R1 théorique (Ohm)			1 240 000			2 490 000
R1 choisie (Ohm)			1 245 000			2 490 000
R2 théorique (Ohm)	10 000	16824	51875	10000	33649	103750
R2 choisie (Ohm)	10 000	15 740	47 000	10000	33000	94000
Tension max réelle (V)	251	160	55	500	153	55

Les canaux de mesures, fixés par le client, ont servi de base à la détermination des valeurs des différentes résistances utilisées. En fixant R_2 à 10 kΩ afin d'obtenir une impédance minimale pour la plus faible résistance, nous obtenons alors une résistance théorique de 1 240 kΩ pour R_1 dans le cas continue et 2 490 kΩ pour le cas alternatif. Ces valeurs ont été déterminées en se basant sur la formule du pont diviseur de tension, en posant X la tension d'entrée et Y la tension aux bornes de R_2 :

$$\frac{Y}{X} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

En posant $Z = \frac{Y}{X}$, on aboutit alors à l'équation suivante :

$$Z = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$
$$Z \,.\, (R_1 + R_2) = R_2$$
$$Z \,.\, R_1 = R_2 \,.\, (1 - Z)$$
$$R_1 = R_2 \,.\, \frac{(1 - Z)}{Z}$$

Ayant posé R_2 = 10 kΩ, nous arrivons donc aux valeurs théoriques de 1 240 kΩ et 2 490 kΩ pour R_1, en fonction de si la nature de la source de tensions, comme nous l'avions calculé dans le tableau vu plus haut.

Une fois R1 déterminée, nous pouvons utiliser la formule écrite ci-dessus pour fixer R_2 de la même manière pour les différents canaux de mesures, ce qui nous donne les valeurs 17 kΩ et 52 kΩ pour la source continue et 34 kΩ et 104 kΩ pour la source alternative. Afin de prévoir une plage permettant le changement de ces canaux, nous réduisons donc la valeur des résistances pour avoir une tension maximale légèrement plus grande.

Les résistances sont finalement fixées dans un but d'uniformiser les résistances choisies afin de diminuer les coûts en prenant plusieurs dizaines de références : la résistance 15 740 Ω pour le canal 50-150 V de la source de tension continue, par exemple, est en fait constituée de deux résistances en série ayant une impédance de 7,87 kΩ chacune, ces résistances étant retrouvées ailleurs dans le projet.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.2.1.2 LISTE DES COMPOSANTS

Une fois les valeurs des résistances décidées, nous arrivons finalement à la liste de composants suivantes pour la partie récupération des tensions :

Description	Nombre	Référence	Prix (€) par unité
Amplificateur d'isolation	2	ACPL-C87B-000E d'Avago	6,35
Amplificateur opérationnel	1	OPA2374AIDCNR de TI	1,65
Démultiplexeur 2 vers 4	1	MC74ACT139DG de On Semiconductor	0,48
Relais reed	6	HE3621A0500 de Littlefuse	0,86
Prise RJ45	1	54601-908WPLF de Amphenol ICC	0,356
Diode Zener 2,2 V	2	UDZVTE-172.2B de ROHM	0,152
Diode Zener 36V	2	1N5938BRLG de On Semiconductor	0,328
Résistance 1 k	4	MCWR08X1001FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 2,55 k	4	ERJP06F2551V de Panasonic	0,0949
Résistance 7,87 k	20	MCWR08X7871FTL de Multicomp Pro	0,0041
Résistance 10 k	4	MCWR08X1002FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 47 k	2	MCWR08X4702FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 249 k	10	CRCW0805249KFKEA de Vishay	0,0834
Potentiomètre variable 2,5 k	6	3362P-1-252LF de BOURNS	0,289
Condensateur 100 n, 25 V	12	CL21B104KACNNNC de Samsung Electro-Mechanics	0,0511
Condensateur 100 n, 50 V	2	C0805C104M5RACTU de KEMET	0,0489
Bornier	2	PM5.08/2/90 de WEIDMULLER	0,505
TOTAL			**26,1346**

Tableau des composants pour le bloc 'récupération des valeurs' : Tensions continues DC1 et DC2

Description	Nombre	Référence	Prix (€) par unité
Amplificateur d'isolation	1	ACPL-C87B-000E d'Avago	6,35
Amplificateur opérationnel	1	OPA2374AIDCNR de TI	1,65
Démultiplexeur 2 vers 4	1	MC74ACT139DG de On Semiconductor	0,48
Relais reed	6	HE3621A0500 de Littlefuse	0,86
Prise RJ45	1	54601-908WPLF de Amphenol ICC	0,356
Diode Zener 2,2 V	1	UDZVTE-172.2B de ROHM	0,152

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Diode Zener 36V	1	1N5938BRLG de On Semiconductor	0,328
Pont redresseur à diodes, 50 V	2	DF005S2 de On Semiconductor	0,39
Résistance 1 k	2	MCWR08X1001FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 2,55 k	2	ERJP06F2551V de Panasonic	0,0949
Résistance 4,3 k	1	MCWR08X4301FTL de Multicomp Pro	0,007
Résistance 10 k	2	MCWR08X1002FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 33 k	6	MCWR08X3302FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 47 k	2	MCWR08X4702FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 249 k	10	CRCW0805249KFKEA de Vishay	0,0834
Potentiomètre variable 2,5 k	3	3362P-1-252LF de BOURNS	0,289
Condensateur 100 n, 25 V	6	CL21B104KACNNNC de Samsung Electro-Mechanics	0,0511
Condensateur 100 n, 50 V	1	C0805C104M5RACTU de KEMET	0,0489
Condensateur 1 m, 50 V	2	MCGPR50V108M16X26 de Multicomp Pro	0,705
Bornier	1	PM5.08/2/90 de WEIDMULLER	0,505
TOTAL			**19,5629**

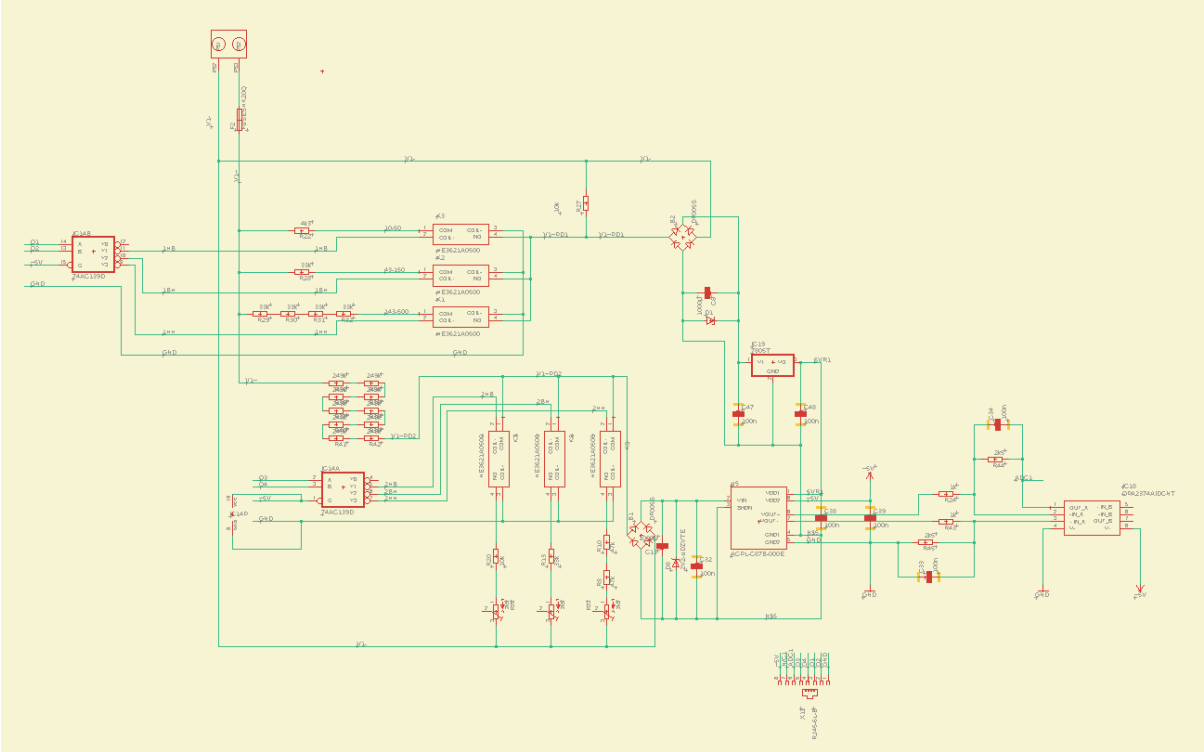
Tableau des composants pour le bloc 'récupération des valeurs' : Tension alternative AC

III.2.1.3 SCHEMATIC

Une fois les composants listés, nous créons donc le schematics sur lequel nous allons nous appuyer pour réaliser le PCB. Celui affiché ci-dessous est celui associé à la récupération des tensions alternatives, il diffère de ceux mesurant la tension continue étant donné qu'il est nécessaire de redresser la tension en entrée de l'ACPL-C87B et du 78L05. De plus, il dispose de 3 ponts diviseurs de tensions avec leurs relais associés avant l'alimentation du régulateur de tension 5V :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



Schematic du bloc de mesures des tensions pour la source alternative

III.2.2 PILOTAGE DES CARTES "AFFICHEURS"

III.2.2.1 JUSTIFICATION DES SOLUTIONS RETENUES

Afin d'afficher la tension mesurée sur le banc, nous utilisons un total de 12 afficheurs 7 segments. Les commander tous grâce aux sorties du microcontrôleur auraient demandé de dédier un trop gros nombre de ces sorties à cette fonction, même en utilisant un multiplexage des digits. C'est pourquoi nous avons recouru à l'utilisation d'un driver de LEDs pour piloter de nombreuses sorties avec un nombre d'entrées limitées.

Nous avions besoin de 7 sorties pour piloter les segments des 4 afficheurs à gauche du banc et 7 autres pour les 8 afficheurs à droite, soit déjà 14 sorties dédiées à la sélection des segments à allumer. Utilisant un multiplexage des 4 digits à gauche et des 8 digits à droite, 12 autres sorties ont été nécessaires à la sélection de ces digits. Le nombre total de sorties à piloter par le module est donc de 26.

Ne nécessitant que deux entrées numériques, notre choix s'est porté sur le module MM5451 de Microchip et ses 35 sorties. Ce module, alimenté par une tension comprise entre 4,75 et 11 VDC, dispose donc de 35 sorties fonctionnant comme des puits de courant. Ainsi, ces sorties se connectent aux LEDs sur leur cathode comme une masse dont le potentiel varie en fonction de la consigne : ces LEDs nécessitent donc d'être alimentées par une source de tension sur leur anode, et non l'inverse.

Une entrée du module permet de faire varier la luminosité de l'affichage et peut être utilisée pour automatiser le réglage de cette luminosité en fonction de celle de la pièce. Dans notre cas, nous nous contenterons d'utiliser un potentiomètre de très forte impédance pour régler les afficheurs une fois qu'ils seront en place étant donné que l'éclairage de la salle E001 est relativement constant.

Pour connecter les 26 sorties utilisées du MM5451 aux trois cartes “*afficheurs*", nous utilisons là encore des prises RJ45 comme nous l’avons fait de l’autre côté : 4 prises RJ45 sont donc utilisées afin d’envoyer les signaux par le câble Ethernet, deux prises pour chaque côté du banc.

III.2.2.2 LISTE DES COMPOSANTS

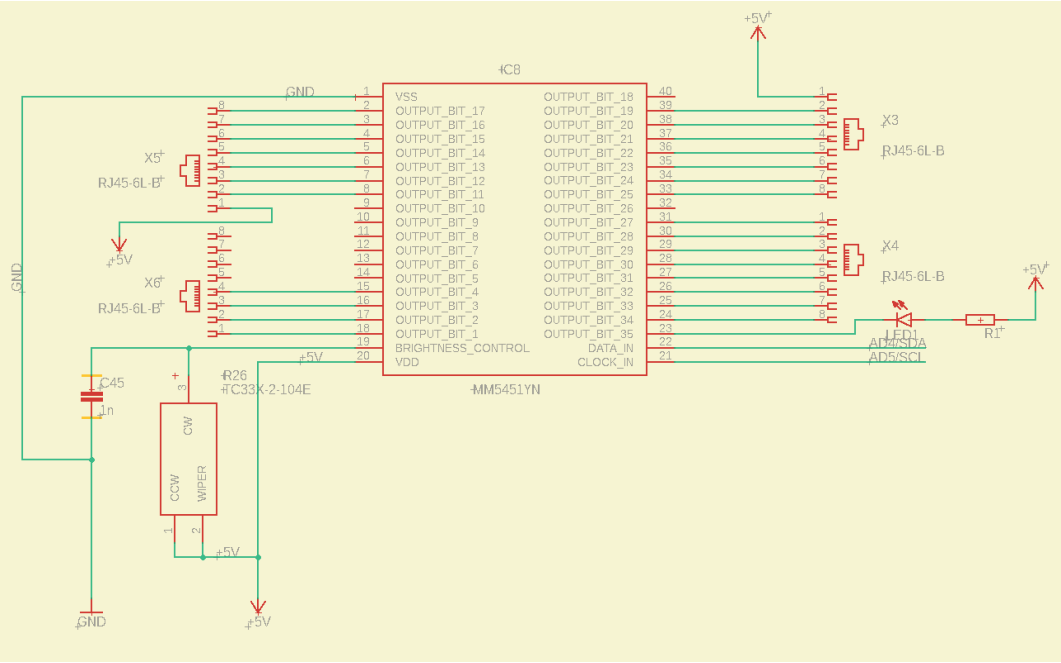
Le matériel nécessaire pour envoyer les informations aux cartes “afficheurs” est donc regroupé dans le tableau suivant :

Description	Nombre	Référence	Prix / unité
Driver de LEDs 35 sorties	1	MM5451 de Microchip	4€72
Prise RJ45	4	54601-908WPLF de AMPHENOL ICC	0€356
Potentiomètre 100 kΩ	1	TC33X-2-104E de Bourns	0€23
Capacité 1 nF	1	MC0805B102K500CT de Multicomp Pro	0€064
TOTAL			**6€438**

Tableau des composants pour le bloc ‘Pilotage des cartes afficheurs’

III.2.2.3 SCHEMATIC

Ci-dessous se trouve le schematic du bloc « pilotage des cartes afficheurs » centré autour du driver de LEDs MM5451 et de ses 35 sorties dont la plupart sont branchées à des prises RJ45 :



Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Schematic du bloc gérant les afficheurs 7 segments, basé sur le MM5451

III.2.3 ENVOI DES DONNEES SUR LE RESEAU

III.2.3.1 JUSTIFICATION DES SOLUTIONS RETENUES

Enfin, le dernier bloc gère la transmission des données vers le réseau Ethernet de la salle afin de les stocker sur une base de données. Ce bloc sera principalement composé d'une prise RJ45 afin d'y connecter un câble Ethernet mais aussi un module permettant la communication avec les réseaux grâce au protocole TCP/IP. Ayant déjà utilisé des shields Ethernet conçus pour permettre à des cartes Arduino d'envoyer des données sur le réseau, j'ai souhaité me baser sur leur architecture et ai donc choisi les puces W5100 de Wiznet pour les intégrer à la carte "*principale*".

Ce choix de puce me permettait par la même occasion de pouvoir utiliser mon shield Ethernet pour réaliser un prototype et vérifier que la partie logicielle du projet fonctionne, éliminant donc les problèmes d'infrastructures et me permettant de gagner du temps sur le développement du programme.

Les puces W5X00 de Wiznet communiquent avec le microcontrôleur grâce au protocole SPI nécessitant 4 pins.

III.2.3.2 LISTE DES COMPOSANTS

Finalement, nous parvenons à la liste de matériel suivante pour la fonction d'envoi des données sur le réseau de la salle :

Description	Nombre	Référence	Prix / unité
Puce Ethernet	1	W5100 de WIZnet	5€03
Cristal 25 MHz	1	LFXTAL033342 de IQD	0€332
Connecteur RJ45	1	54601-908WPLF de Amphenol ICC	0€356
Comparateur	1	SN74LVC1G14DBVR de TI	0€23
Perle de ferrite	2	MH2029-300Y de BOURNS	0€0684
LED jaune	2	597-5406-507F de Dialight	0€324
Résistance 49R9	4	MCWR08X49R9FTL de Multicomp Pro	0€0078
Résistance 300R	1	MCWR08X3000FTL de Multicomp Pro	0€0078
Résistance 1k	2	MCWR08X1001FTL de Multicomp Pro	0€0078
Résistance 10k	1	MCWR08X1002FTL de Multicomp Pro	0€0078
Résistance 12k	1	WCR0805-12KFI de TT Electronics	0€0344
Résistance 1M	1	MCWR08X1004FTL de Multicomp Pro	0€0078
Capacité 22p	2	885012007012 de Wurth Elektronik	0€08

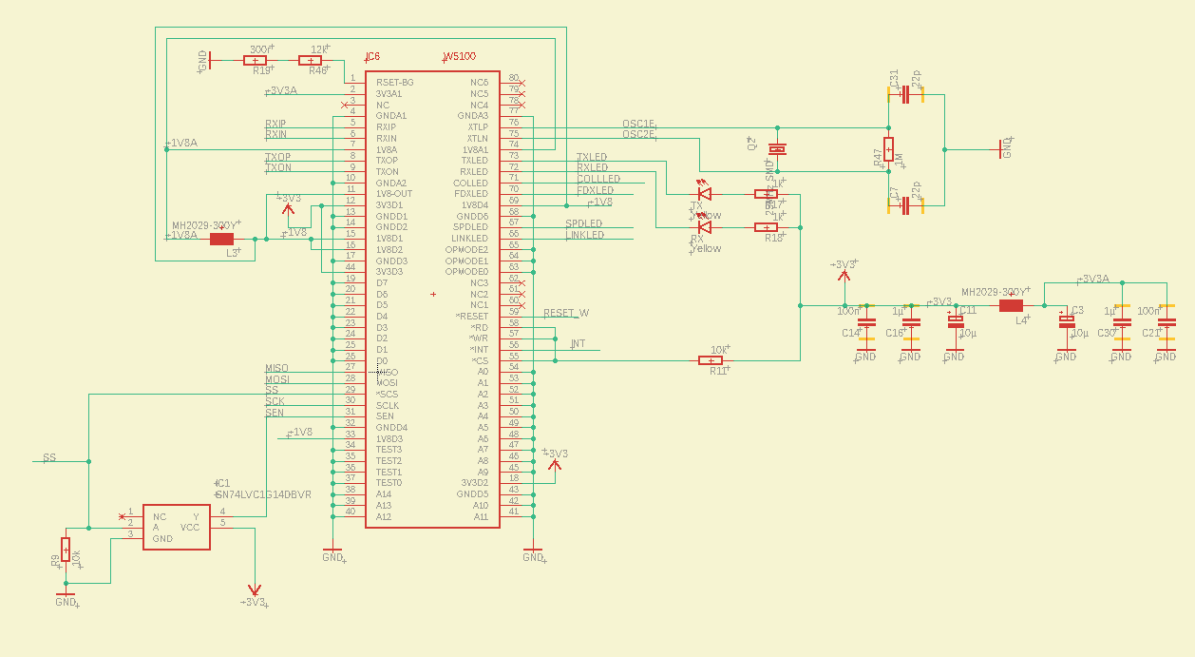
Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Capacité 100n	5	CL21B104KACNNNC de Samsung Electro-mechanics	0€0511
Capacité 1µ	2	CL21B105KOFNNNE de Samsung Electro-mechanics	0€0626
Capacité 10µ, polarisée	2	MCGPR25V106M5X11 de Multicomp Pro	0€0452
TOTAL			**7€3695**

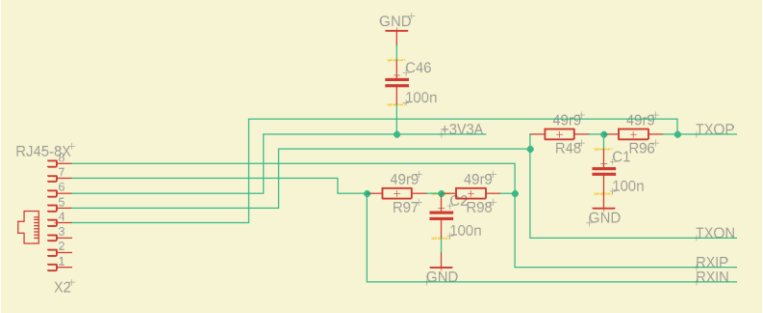
Tableau des composants pour le bloc 'Envoi des données sur le réseau'

III.2.3.3 SCHEMATIC

Le schematic de ce bloc est centré sur la puce W5100 permettant le dialogue avec le réseau tel que montré ci-dessous :



Schematic du W5100 et des composants qui lui sont liés



Schematic de la prise RJ45 permettant l'envoi des données sur le réseau

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.2.4 TRAITEMENT DES INFORMATIONS FAISANT LE LIEN ENTRE LES TROIS BLOCS PRECEDEMMENT TRAITES

III.2.4.1 JUSTIFICATION DES SOLUTIONS RETENUES

Afin de regrouper les différents blocs et traiter les informations, il a enfin fallu choisir un microcontrôleur disposant donc de 3 entrées analogiques pour récupérer les mesures de tensions, de 6 sorties numériques pour la gestion des canaux de mesures, 2 sorties numériques pour la gestion de l'alimentation du module 78L05 dans le cas alternatif, 2 autres sorties numériques pour la gestion des afficheurs et enfin 4 autres sorties numériques pour la communication avec le module Ethernet, soit un total de 3 entrées analogiques et 14 sorties numériques.

Le microcontrôleur Atmega-328P de Microchip dispose de 14 I/O numériques et de 6 entrées analogiques et est donc parfaitement adapté à notre utilisation. Dans le but de conserver les pins liés à la communication série à des fins de déverminage, nous avons utilisé 2 des I/O analogiques comme sorties numériques afin de piloter le driver de LEDs MM5451. Ainsi, tous les pins de l'Arduino, hormis une entrée analogique, sont utilisés.

Ce microcontrôleur étant utilisé par Arduino comme base de leur carte UNO, il est bien connu dans l'univers de l'open source et de nombreux liens nous ont permis de créer notre carte autour de ce microcontrôleur afin de réguler les tensions 5V et 3V3 nécessaires au bon fonctionnement de notre carte par exemple.

III.2.4.2 LISTE DES COMPOSANTS

La liste des composants utilisés dans ce bloc est reprise dans le tableau suivant :

Description	Nombre	Référence	Prix (€) par unité
Microcontrôleur	1	ATMEGA328P-PU de Microchip	1,7
Oscillateur 16 MHz	1	NCT050C	
Prise jack DC 12V	1	MJ-179PH de Multicomp	0,696
Diode de récupération standard	1	1N4007G de ON Semiconductor	0,197
Régulateur de tension 5V	1	NCP1117ST50T3G de ON Semiconductor	0,423
Régulateur de tension de commutation pour 3V3	1	LM2734YQMKE/NOPB de TI	2,93

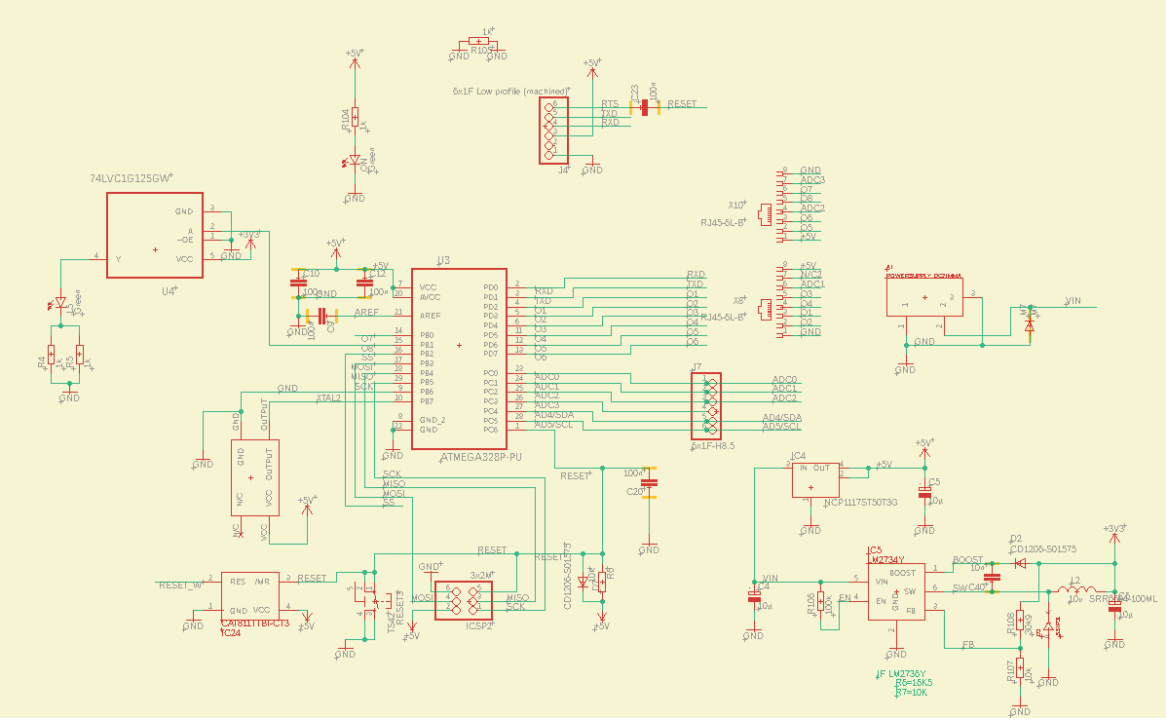
Diode et redresseur Schottky	1	SS1P3L-M3 de Vishay Semiconductors	0,441
Superviseur d'alimentation MCU	1	CAT811TTBI-GT3 de ON Semiconductor	0,394
Commutateur tactile	1	1825910-7 de Alcoswitch – TE Connectivity	0,0682
Buffer / Driver de ligne	1	74LVC1G125GW de Nexperia	0,162
Prise RJ45	2	54601-908WPLF de Amphenol ICC	0,356
Diode signaux faibles	2	CD1206-S01575 de BOURNS	0,0665
LED verte	2	597-5326-507F de Dialight	0,365
Inductance SRR0604-100ML	1	SRR0604-100ML de Bourns	0,62
Résistance 1k	4	MCWR08X1001FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 10k	2	MCWR08X1002FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 30,9k	1	ERJP06F3092V de Panasonic	0,0833
Résistance 100k	1	MCWR08X1003FTL de Multicomp Pro	0,0077
Capacité 10n	1	885012207092 de Wurth Elektronik	0,08
Capacité 100n	5	CL21B104KACNNNC de Samsung Electro-mechanics	0,0511
Capacité 10µ, polarisée	3	MCGPR25V106M5X11 de Multicomp Pro	0,0452
TOTAL			**9,8151**

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.2.4.3 SCHEMATIC

Voici le schematic montrant les connexions à réaliser pour le bloc de « Traitement des informations », dernier bloc de notre carte *Principale*. Il est donc centré autour de notre microcontrôleur, l'Atmega 328P, autour duquel se trouvent l'oscillateur, les régulateurs de tensions et l'alimentation.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



Schematic du bloc 'traitement des données', comprenant l'atmega 328P et des composants qui lui sont liés

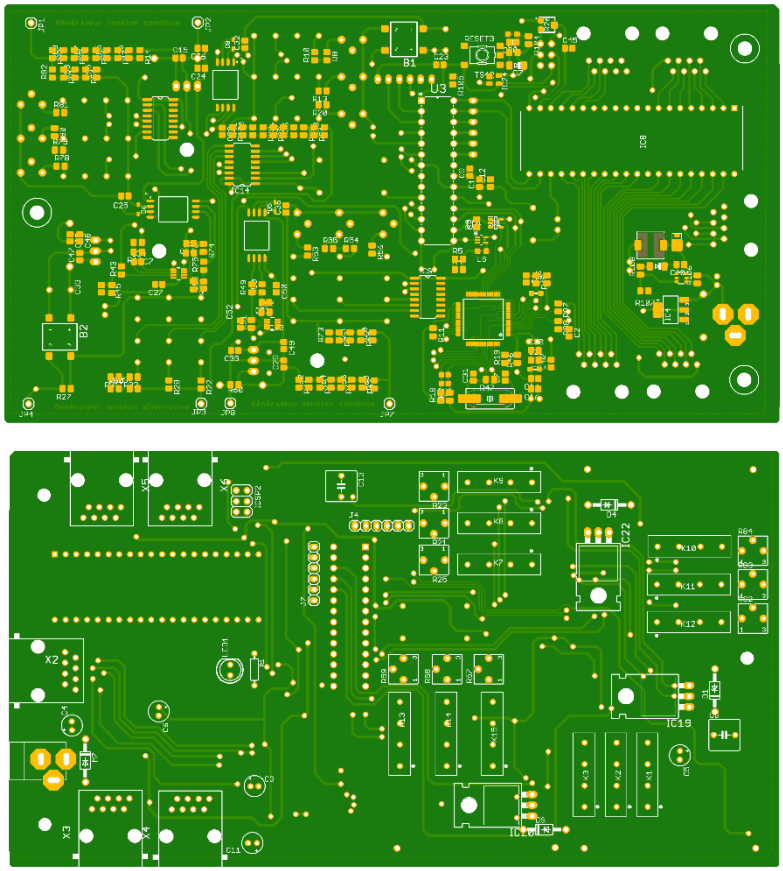
III.2.5 CREATION DU PCB

III.2.5.1 PREMIERE VERSION

III.2.5.1.1 CONCEPTION

Une fois la liste des composants décidée et le schematic les liant créé, il resta alors le routage de la carte. Le design de celle-ci fut d'abord pensé pour que les quatre blocs énoncés plus tôt soient liés au même PCB et éviter l'utilisation de câble entre ceux-ci. Après deux semaines de travail, le résultat fut le suivant :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



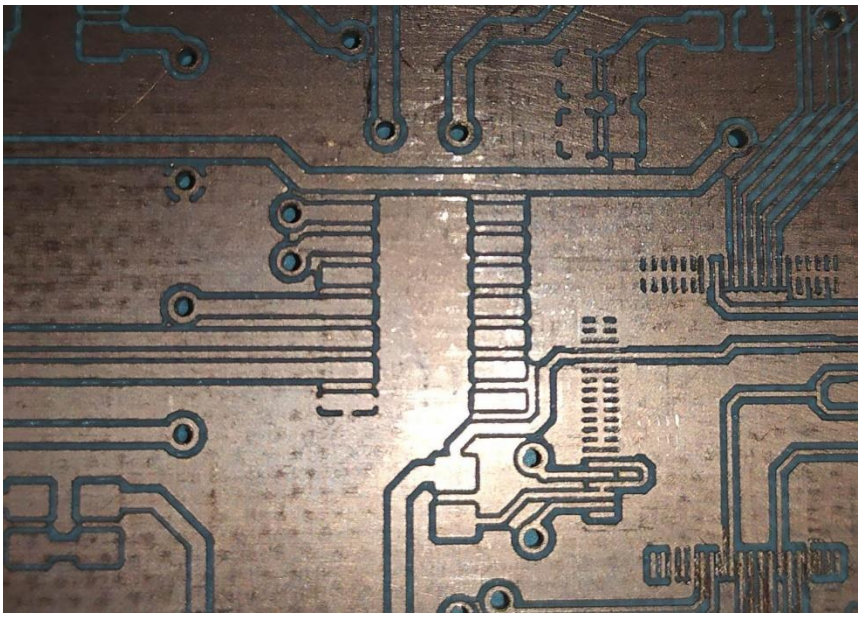
Top et bot de la première version de la carte "principale"

La première version de cette carte fut récupérée le 30 novembre, deux semaines après l'envoi à l'atelier.

III.2.5.1.2 DEFAUTS

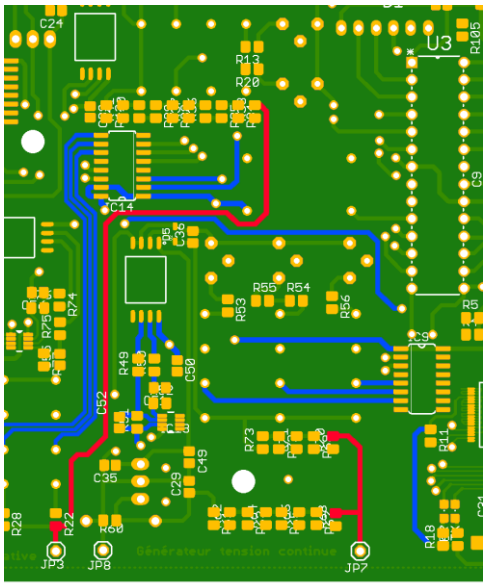
Cette carte souffre cependant de problèmes tels que des îlots orphelins, se logeant parfois entre les pins de certains composants et pouvant donc compliquer la soudure de ces derniers.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



Sur cette photo se trouve un exemple des îlots se trouvant entre les pattes du composant à souder

Plus important, la phase de la source alternative traverse une grande partie du circuit et frôle les composants de la partie très basse tension à quelques millimètres près. La distance minimale entre deux pistes afin d'assurer l'isolation galvanique étant de 6 mm, la sécurité de cette carte est donc compromise et il a été nécessaire de travailler sur une seconde version de cette carte en utilisant davantage d'espace pour assurer l'isolation galvanique demandée par le client.



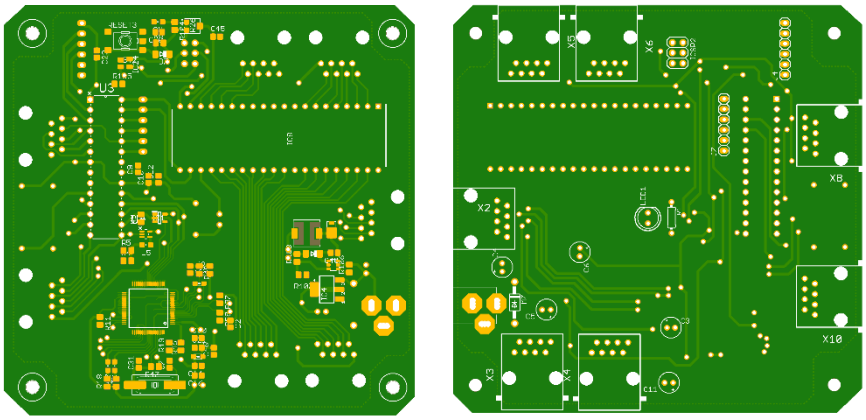
Sur ce morceau de carte, en rouge, nous pouvons apercevoir la phase de la source alternative en bas à gauche et la borne positive de la source continue en bas à droite. En bleu se trouve le circuit lié directement au microcontrôleur

III.2.5.2 DEUXIEME VERSION

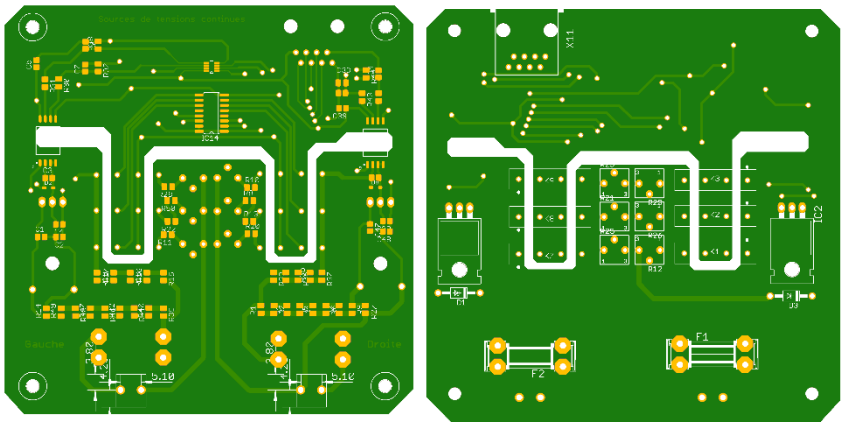
Lors du projet, une seconde version a donc été proposée dans le but de résoudre le problème de l'isolation galvanique rencontré avec la première version.

III.2.5.2.1 CONCEPTION

Cependant, la carte conçue mi-novembre dispose déjà une surface d'environ 10x20 cm², surface maximale pouvant être utilisée pour l'intégration de celle-ci dans un des bancs de la salle E001, et la répartition des composants sur cette surface ne peut pas beaucoup plus être optimisée. Il a donc été décidé de découper cette carte en trois sous cartes jointes entre elles par des câbles Ethernet comme nous le faisons pour les cartes "*afficheurs*".

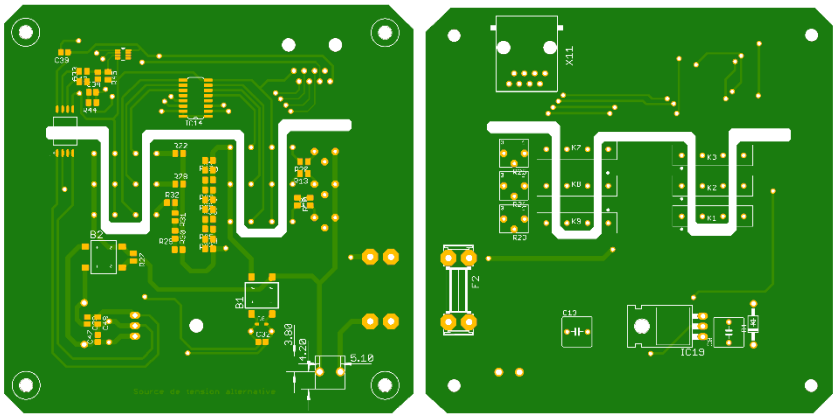


Top et bot de la carte sur laquelle se trouve le microcontrôleur, le W5100 et le driver de LEDs



Top et bot de la carte permettant la mesure des tensions continues

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



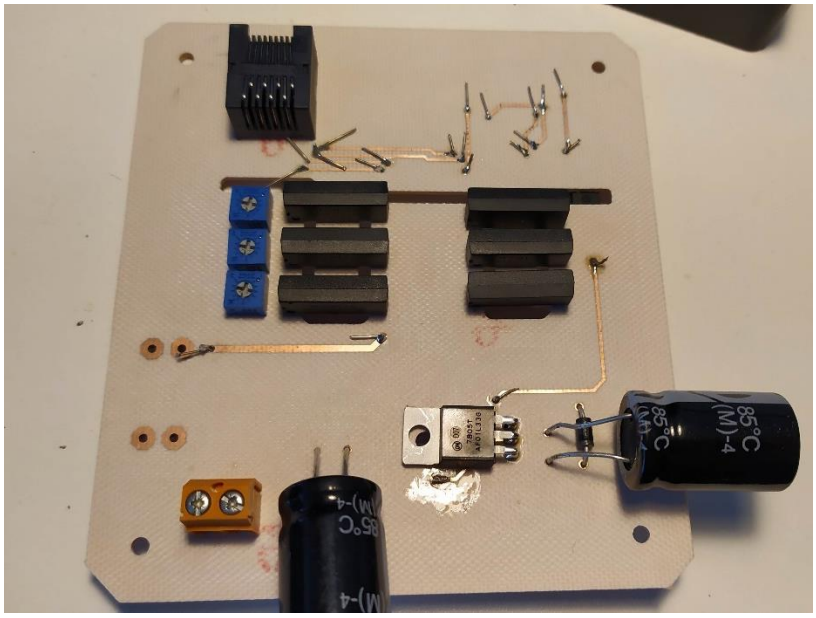
Top et bot de la carte permettant la mesure de la tension alternative

Ces trois cartes ont été dessinées à partir du même layout et sont donc toutes trois aux mêmes dimensions afin de les empiler facilement si besoin : de cette manière, nous comblons le manque de surface en exploitant la hauteur ou en séparant les cartes lors de l'intégration, et permettent à la solution de gagner en flexibilité.

Envoyées le 4 décembre au service d'impression de Polytech en urgence afin de rattraper le retard apporté avec cette seconde impression, ces cartes n'ont pu être imprimées que le 16 décembre suite à un problème technique sur la machine permettant l'impression des cartes électroniques.

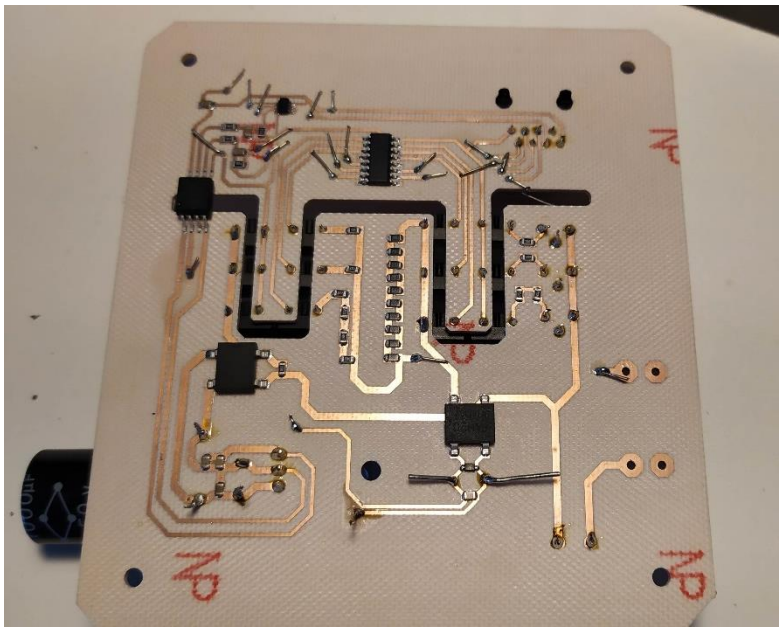
Bien que M. FLAMEN ait utilisé son outil le plus fin lors de l'élaboration de la carte, cela n'a pas été suffisant pour graver les pistes autour du W5100 qui sont trop fines pour être faites en interne à Polytech. L'utilisation de ce composant nécessite donc de sous-traiter la carte par une entreprise extérieure.

J'ai toutefois pu récupérer la carte permettant la mesure des tensions alternatives et j'ai donc soudé les composants sur cette carte avant de la vérifier pour éviter les courts-circuits.



Face top de la carte permettant le traitement de la tension alternative

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



Face bot de la carte permettant le traitement de la tension alternative

III.2.5.2.2 ESSAIS

Nous avons pu tester cette carte après la soutenance en appliquant une tension alternative d'amplitude 7 V en entrée de cette carte. Après avoir isolé chaque partie de la carte en sectionnant les pistes liant les différents blocs et après avoir appliqué les tensions nécessaires en entrée des 6 relais, nous avons constaté que le pont diviseur de tension fonctionnait correctement et que le gain de ce bloc était celui escompté. Cependant, nous avons cru obtenir un gain faussé lorsque le bloc d'alimentation de l'ACPL-C87B était utilisé : nous avons donc choisi, afin d'effectuer mes tests de la meilleure manière, d'alimenter l'amplificateur d'isolation via le 5 VDC de l'Arduino, rompant ainsi l'isolation galvanique qui n'était pas nécessaire pendant cette phase de tests.

Le bloc de redressement composé principalement du pont de diodes a cependant posé problème : la chute de tension de ce pont n'a pas été prise en compte lors du design de cette carte et nous sommes donc privés de plus de la moitié de la prise de mesures puisque la chute de tension est de 1,1 V et la plage de mesure est de 2 V au maximum. De plus, nous avons remarqué qu'après avoir appliqué une tension importante telle que les 230 VAC en entrée, la tension en sortie du pont redresseur n'avait pas varié ou très peu, bien que nous fussions nettement au-dessus de la tension correspondant à celle de la chute de tension du redresseur. Nous avons donc analysé la dynamique du système après une simulation sur LTSpice pour trouver l'origine du problème.

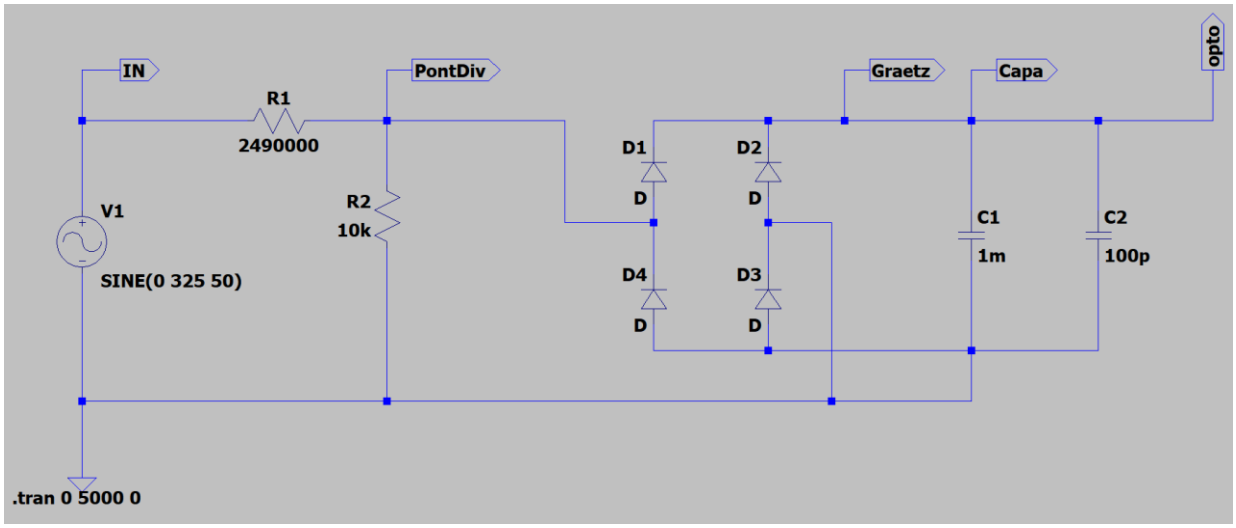
Enfin, le dernier bloc permettant l'isolation galvanique et l'envoi de la mesure au microcontrôleur semble fonctionnel : nous récupérons bien une tension sur les deux pins en sortie de l'ACPL-C87B et la tension en sortie de l'OPA237 correspond bien à la tension en sortie du pont redresseur multipliée par un gain de 2,5.

La carte électronique est donc fonctionnelle mais la partie conversion de la tension alternative en tension continue est à revoir. D'après ces tests, nous pouvons cependant garantir que la carte

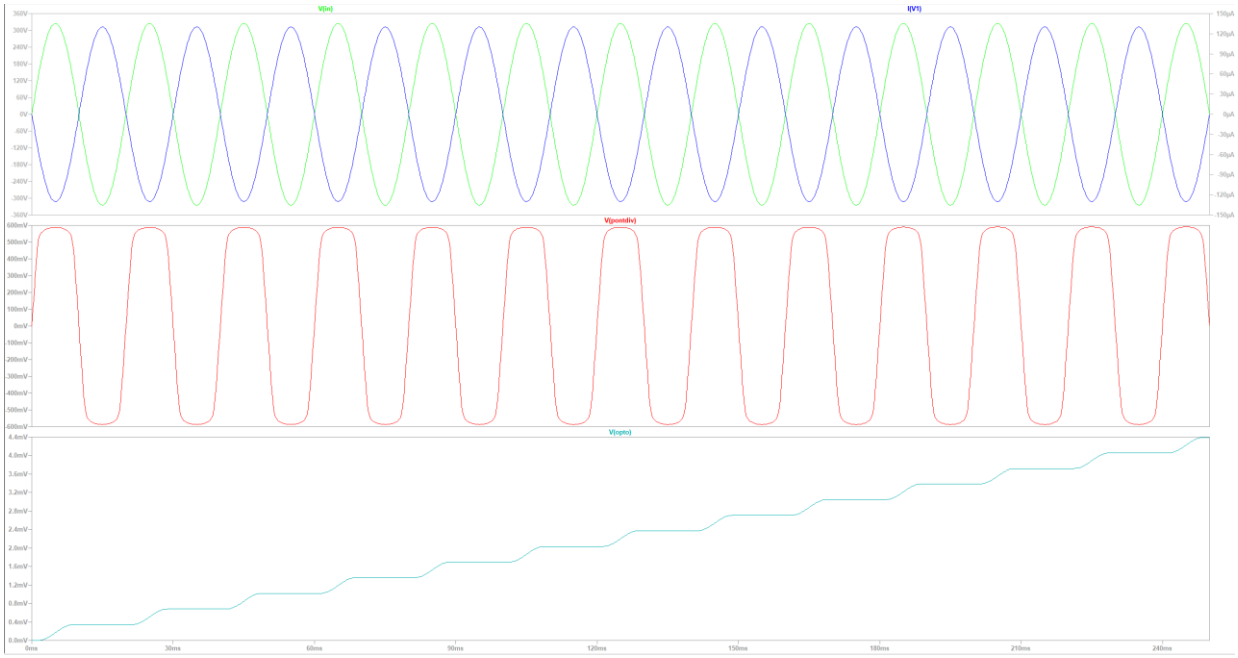
Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

électronique permettant la mesure des deux sources continues sera fonctionnelle. En effet, celle-ci est basée sur les mêmes composants que la carte étudiée ci-dessus à laquelle nous retirons la partie “redresseur” qui est le bloc posant problème dans notre cas.

Nous avons donc recréé le circuit en amont de l’ACPL-C87B-000E sur le logiciel et avons appliqué en entrée une tension de 325 V d’amplitude (230 V efficace) à 50 Hz telle que dans nos tests sur le banc de TP.



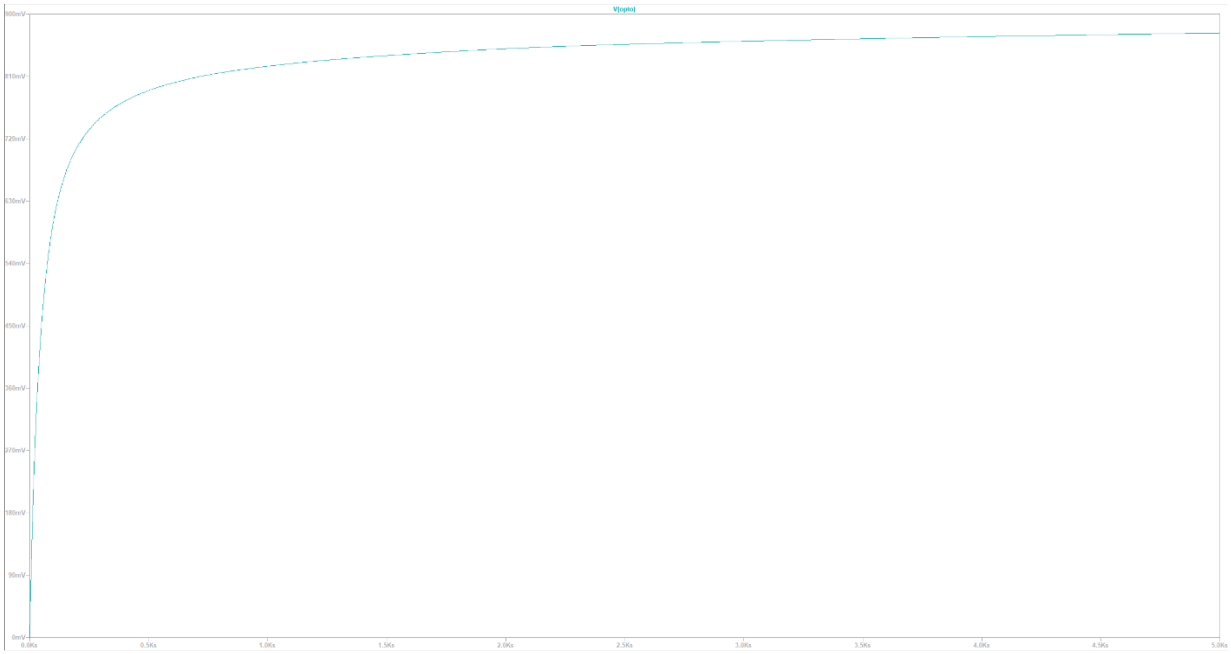
En théorie, avec une tension de 325 V d’amplitude en entrée, nous devrions avoir une tension de $V_s = \frac{R_2}{R_1+R_2}.V_e = \frac{10}{2490+10}.325 = 1{,}3\ V$ en sortie du pont diviseur de tension, redressée ensuite par le pont de Graetz.



Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Courbes obtenues sur LTSpice (pas de temps : 30 ms) :
1ère ligne : Tension et courant de sortie de la source de tension
2ème ligne : Tension en sortie du pont diviseur de tension
3ème ligne : Tension en entrée de l'optocoupleur

En sortie du pont diviseur de tension, on retrouve sur cette simulation une tension alternative de 1.3 V d'amplitude telle que supposée. Mais la chute de tension due au pont de Graetz ainsi que le temps de chargement de la capacité, non pris en compte auparavant, ne permettent pas d'atteindre rapidement une tension continue de 1,3 V comme nous pouvons le voir sur la courbe suivante :



Tension en entrée de l'optocoupleur entre 0 et 910 mV sur 5 000 secondes.
Pas de temps : 500 s. Pas de tension : 91 mV

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

D'après la simulation faite sur LTSpice, nous obtenons le tableau de mesures suivant :

Temps (s)	60	500	1 000	50 000
Tension (V)	0,493	0,790	0,824	0,931

Tableau de valeurs retraçant l'évolution de la tension en entrée de l'optocoupleur en fonction du temps

Nous pouvons donc voir que la tension théorique de 1,3 V n'est donc jamais atteinte, même après plus d'une demi-journée. Par cette simulation, le système proposé est donc invalide et une autre version doit être refaite en prenant en compte la dynamique du système.

III.2.6 TROISIEME VERSION

A la suite du problème du dimensionnement du redresseur de la carte alternative soulevé lors de nos tests, nous avons refait un tableau théorique des valeurs que nous devons retrouver avant d'effectuer des analyses sur LTSpice afin de trouver une solution au temps de réponse et à la précision du système.

III.2.6.1 AMELIORATION DU TEMPS DE REPONSE

Le temps de réponse du circuit étant égal au produit RC, nous pouvons donc diminuer la valeur de la capacité pour diminuer le temps de réponse tout en gardant une grande charge résistive permettant de manipuler un courant très faible : diviser ainsi la taille du condensateur par 1000 permettra de réduire le temps de réponse d'autant.

Nous avons donc effectué plusieurs simulations en faisant varier la capacité C1 :

- C1 = 10 nF

Tension aux bornes de l'optocoupleur pour C1 = 10 nF.
Pas de temps : 3 s. Pas de tension : 0,1 V

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Avec C1 = 10 nF, nous obtenons les tensions suivantes après 3, 30 et 400 secondes. La tension n'évolue plus après 400 secondes.

Temps (s)	3	30	400
Tension (V)	0.978	1.034	1.074

Nous pouvons donc voir que le temps de réponse est bien plus faible avec une telle capacité, mais reste cependant trop important : il faut alors attendre 30 secondes pour avoir 95% de la valeur finale. Or, nous souhaitons obtenir une marge d'erreur inférieure à 1% et avec un temps de réponse inférieur à 1 seconde.

- Retrait de C1

Nous avons ensuite simulé la tension récupérée après avoir retiré C1 et laissé la capacité C2 de 100 pF. La courbe d'évolution est la suivante :

Tension aux bornes de l'optocoupleur après avoir supprimé C1.
Pas de temps : 1 s. Pas de tension : 0,1 V

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Nous obtenons alors les tensions suivantes :

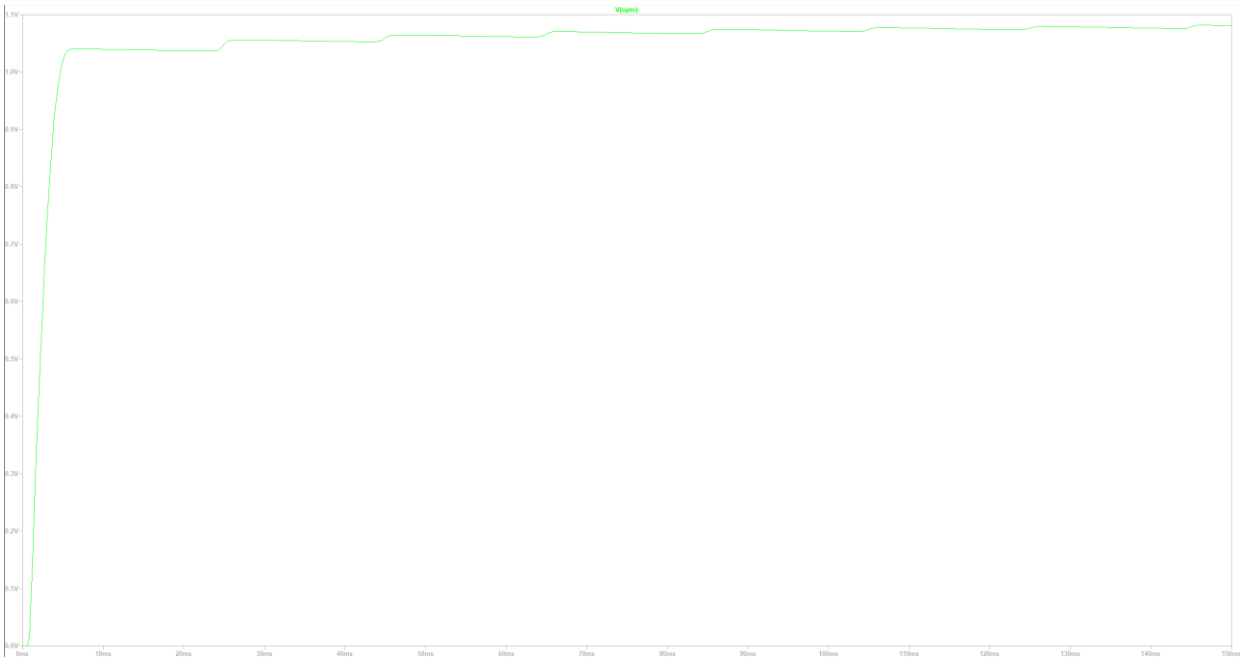
Temps (s)	0.5	1	3	10
Tension (V)	1.047	1.060	1.072	1.075

Après avoir divisé par 100 la valeur de la capacité, nous voyons que le temps de réponse a lui aussi été divisé par 100, puisque ce dernier est proportionnel à la valeur de la capacité. En supprimant C1, nous obtenons alors un temps de réponse de l'ordre de quelques secondes : il nous faudrait encore diviser celui-ci par 10 pour respecter les spécifications.

Nous pouvons, cependant, voir des oscillations qui montre que la capacité ne filtre plus aussi bien le signal. Ces oscillations sont tout de même à relativiser puisque nous avons des valeurs comprises entre 1,0742 et 1,0747 V après 5 secondes, soit des oscillations de l'ordre de 0,5 mV. Notre système étant sensible à des variations de tensions de $\frac{U}{2^{10}} = \frac{5}{1024} = 4\,mV$, ces changements de valeurs ne seront pas perçus par le système.

- C1 = 10 pF et retrait de C2

En ayant une capacité C de 100 pF, nous avons pu voir que le temps de réponse était encore 10 fois trop grand et que les oscillations pouvaient être encore 10 fois plus importantes avant de pouvoir être repérées par le système. Nous plaçons donc, ici, une seule capacité de 10 pF en sortie du pont de Graetz et obtenons le résultat suivant :



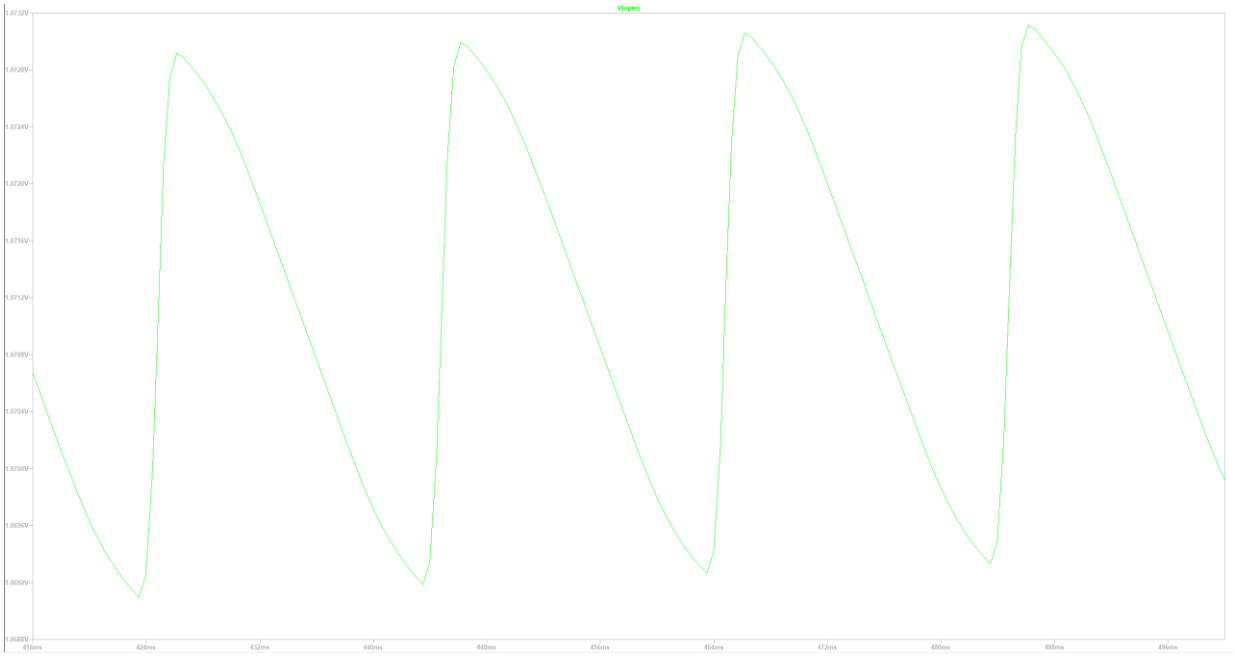
Tension aux bornes de l'optocoupleur après avoir utilisé une capacité C1+C2 de 10 pF.
Pas de temps : 10 ms. Pas de tension : 0,1 V

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Nous obtenons alors les tensions suivantes :

Temps (s)	0.05	0.2	0.5
Tension (V)	1.047	1.060	1.075

Comme nous pouvons le voir, le régime permanent est atteint après une demie seconde et respecte le cahier des charges sur ce point. Les oscillations sont cependant plus importantes et varient, pendant ce régime permanent, entre 1.073 et 1.077 V soit une oscillation de 4 mV comme suggéré par la simulation précédente.



Oscillations aux bornes de l'optocoupleur après 500 ms
Pas de temps : 8 ms. Pas de tension : 0,4 mV

D'après ces analyses, nous pourrions donc garder la carte telle qu'elle est actuellement en dessoudant les capacités situées après le pont de diodes et en ajoutant une nouvelle de 10 pF afin d'obtenir un temps de réponse acceptable.

Cependant, cette solution n'apporte aucun intérêt pour la précision du système : la tension obtenue est de 1,075 V alors que nous attendions 1,3 V, soit une erreur de plus de 20%. Pour pallier ce problème, nous avons fait de nouvelles analyses en permutant les blocs redresseur et pont diviseur

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

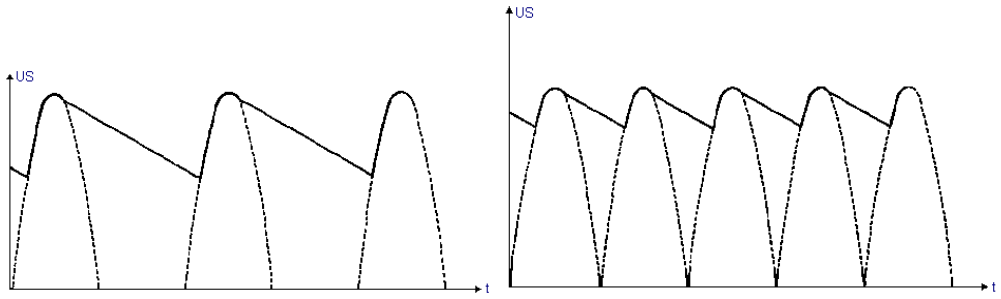
III.2.6.2 AMELIORATION DE LA PRECISION

Après avoir étudié l'importance du choix de la capacité C1 qui impactait grandement le temps de réponse, l'utilisation du pont de diodes pour des tensions inférieures à 2V doit être revu. Nous allons donc intervertir les bloc redresseur et pont diviseur de tension avant d'étudier l'impact du choix du pont de diodes sur la tension en entrée de l'ACPL-C87B-000E.

Pour vérifier la précision de notre circuit, nous créons un tableau pour vérifier les imprécisions théoriques du système par rapport à un cas idéal : ce cas idéal ne prend pas en compte la chute de tension en sortie du pont de diodes (*drop volt*), la tension de ronflement due à la capacité de filtrage (*dU*) ou encore la tolérance des résistances du pont diviseur de tension (*min* et *max*).

En effet, il y a une chute de tension, qui n'avait pas été prise en compte dans notre premier prototype, entre l'entrée et la sortie du pont redresseurs de diodes qui dépend du nombre de diodes présentes : dans le cas d'un redresseur simple alternance nous n'avons qu'une diode et la chute de tension peut donc être de 0,6 V par exemple, alors que pour un redresseur double alternance, utilisant deux diodes, cette chute de tension est doublée. Un redresseur double alternance permet cependant de doubler la fréquence du signal avant de le redresser et donc de diminuer la tension de ronflement.

La tension de ronflement, elle, est due à la valeur du condensateur placé derrière le pont de diodes pour redresser la tension. Si ce condensateur a une valeur suffisamment élevée, la tension redressée peut être considérée comme étant parfaitement continue. Cependant, pour des valeurs plus faibles, les capacités peuvent avoir le temps de se décharger en partie voire complètement : cette variation de tension entre les moments où la capacité est chargée et celle où elle est « déchargée » est ce qu'on appelle la tension de ronflement.



La formule de cette tension de ronflement est :

$$I = C.\frac{dU}{dT} \Leftrightarrow dU = I.\frac{dT}{C} = \frac{I}{C.f}$$

La tolérance des résistances peut éventuellement perturber la mesure : dans le cas de résistances ayant une tolérance de 5%, la précision de la mesure peut varier entre 90,5% et 110,5 % par rapport aux valeurs nominales. Pour une tolérance de 0,1%, la précision se resserre entre 99,8 et 100,2% environ.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Tolér. Résis (%)	0,10%
R1 (kOhm)	10
R2 (kOhm)	2490

PONT DIVISEUR DE TENSION

R1/(R1+R2)			
R1 \ R2	mini	norm	maxi
min	0,004000	0,003996	0,003992
norm	0,004004	0,004000	0,003996
maxi	0,004008	0,004004	0,004000

Erreur avec cas nominal			
R1 \ R2	mini	norm	maxi
min	0,000%	-0,100%	-0,199%
norm	0,100%	0,000%	-0,100%
maxi	0,199%	0,100%	0,000%

Erreur de mesure propre au bloc Pont diviseur de tension
pour des résistances R1 et R2 de 10 et 2490 kOhm respectivement et ayant une tolérance de 0,1%

Choisir des résistances avec une tolérance de 0,1% permettrait donc de réduire l'erreur d'environ 1,8% dans le pire des cas : soit avec une résistance R1 au minimum et une résistance R2 au maximum, soit l'inverse.

Cette imprécision sur la valeur des résistances peut impacter la mesure avec un écart pouvant atteindre, entre le meilleur et le pire des cas, 1,5 V pour une tolérance de 0,1% pour chaque résistance et même plus de 15V d'écart pour des tolérances de l'ordre de 1%.

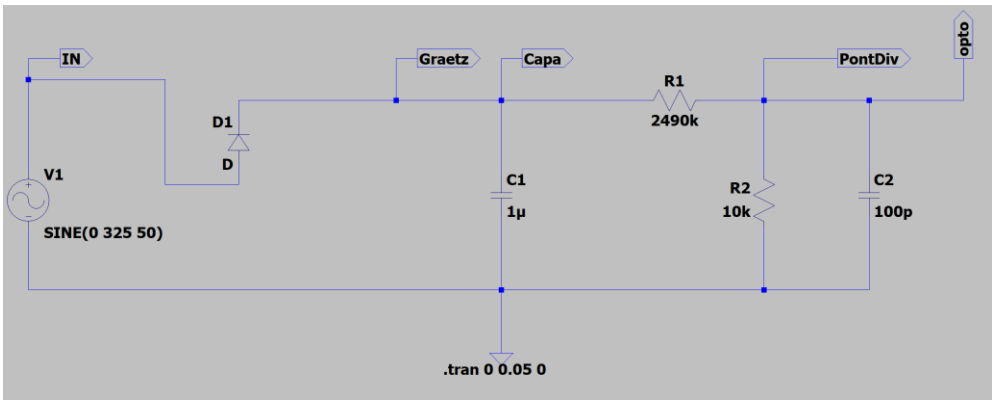
Cette erreur est tout de même à nuancer, étant donné qu'il est nécessaire d'être dans des conditions particulières, à savoir une résistance au maximum de sa plage de tolérance et une à son minimum : deux résistances au maximum de leur plage de tolérance n'entraineront aucune erreur de mesure car le rapport R1/(R1+R2) ne changera pas.

III.2.6.2.1 CAS MONOPHASE

III.2.6.2.1.1 Redresseur simple alternance

Si dans notre premier prototype nous récupérions une tension monophasée en entrée du circuit, le redresseur choisi était un redresseur double alternance comptant 4 diodes. Dans ce paragraphe, nous nous penchons sur le redresseur monophasé simple alternance qui n'utilise qu'une seule diode.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



Circuit avec redresseur simple alternance

Comme dit plus tôt, nous utilisons un tableau théorique afin de prédire le résultat attendu par cette simulation :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Source de tensions :			Redresseur : chute de tension				Condensateur : Tension de ronflement				Tensions après Pont diviseur de tension (V) :				Erreur PDdT (%)			Ecart entre tension calculée et tension parfaite (V) :		
Ue mono eff (V)	Ue mono ampl (V)	Ue tri eff (V)	drop volt (V)	Uredress (V)	Uredress théo (V)	Erreur (%)	I (A)	dU (V)	Umoy (V)	% err	min (x0,998)	normal (x1)	max (x1,002)	Théorique	min	norm	max	min	norm	max
7	10	12,2	9,4	9,4	10,0	6,95%	3E-06	0,062	9,32	-0,33%	0,037	0,037	0,037	0,040	-7,00%	-6,81%	-6,63%	-0,9	-0,8	-0,8
14	20	24,5	19,4	19,4	20,0	3,36%	6E-06	0,129	19,29	-0,33%	0,077	0,077	0,077	0,080	-3,77%	-3,57%	-3,38%	-0,9	-0,9	-0,8
21	30	36,7	29,4	29,4	30,0	2,21%	1E-05	0,196	29,25	-0,33%	0,117	0,117	0,117	0,120	-2,69%	-2,49%	-2,30%	-1,0	-0,9	-0,8
28	40	49,0	39,4	39,4	40,0	1,65%	1E-05	0,262	39,22	-0,33%	0,157	0,157	0,157	0,160	-2,15%	-1,95%	-1,76%	-1,1	-1,0	-0,9
35	50	61,2	49,4	49,4	50,0	1,32%	2E-05	0,329	49,19	-0,33%	0,196	0,197	0,197	0,200	-1,83%	-1,63%	-1,43%	-1,1	-1,0	-0,9
42	60	73,5	59,4	59,4	60,0	1,10%	2E-05	0,396	59,15	-0,33%	0,236	0,237	0,237	0,240	-1,61%	-1,41%	-1,22%	-1,2	-1,0	-0,9
50	70	85,7	69,4	69,4	70,0	0,94%	2E-05	0,462	69,12	-0,33%	0,276	0,276	0,277	0,280	-1,46%	-1,26%	-1,06%	-1,2	-1,1	-0,9
57	80	98,0	79,4	79,4	80,0	0,82%	3E-05	0,529	79,09	-0,33%	0,316	0,316	0,317	0,320	-1,34%	-1,14%	-0,95%	-1,3	-1,1	-0,9
64	90	110,2	89,4	89,4	90,0	0,73%	3E-05	0,596	89,05	-0,33%	0,355	0,356	0,357	0,360	-1,25%	-1,05%	-0,86%	-1,4	-1,2	-0,9
71	100	122,5	99,4	99,4	100,0	0,65%	3E-05	0,662	99,02	-0,33%	0,395	0,396	0,397	0,400	-1,18%	-0,98%	-0,78%	-1,4	-1,2	-1,0
78	110	134,7	109,4	109,4	110,0	0,59%	4E-05	0,729	108,99	-0,33%	0,435	0,436	0,437	0,440	-1,12%	-0,92%	-0,72%	-1,5	-1,2	-1,0
85	120	147,0	119,4	119,4	120,0	0,54%	4E-05	0,796	118,95	-0,33%	0,475	0,476	0,477	0,480	-1,07%	-0,87%	-0,67%	-1,6	-1,3	-1,0
92	130	159,2	129,4	129,4	130,0	0,50%	4E-05	0,862	128,92	-0,33%	0,515	0,516	0,517	0,520	-1,03%	-0,83%	-0,63%	-1,6	-1,3	-1,0
99	140	171,5	139,4	139,4	140,0	0,47%	5E-05	0,929	138,89	-0,33%	0,554	0,556	0,557	0,560	-0,99%	-0,80%	-0,60%	-1,7	-1,4	-1,0
106	150	183,7	149,4	149,4	150,0	0,44%	5E-05	0,996	148,85	-0,33%	0,594	0,595	0,597	0,600	-0,96%	-0,77%	-0,57%	-1,8	-1,4	-1,0
113	160	196,0	159,4	159,4	160,0	0,41%	5E-05	1,062	158,82	-0,33%	0,634	0,635	0,637	0,640	-0,94%	-0,74%	-0,54%	-1,8	-1,4	-1,1
120	170	208,2	169,4	169,4	170,0	0,38%	6E-05	1,129	168,79	-0,33%	0,674	0,675	0,676	0,680	-0,91%	-0,71%	-0,52%	-1,9	-1,5	-1,1
127	180	220,5	179,4	179,4	180,0	0,36%	6E-05	1,196	178,75	-0,33%	0,714	0,715	0,716	0,720	-0,89%	-0,69%	-0,49%	-2,0	-1,5	-1,1
134	190	232,7	189,4	189,4	190,0	0,34%	6E-05	1,262	188,72	-0,33%	0,753	0,755	0,756	0,760	-0,87%	-0,67%	-0,48%	-2,0	-1,6	-1,1
141	200	245,0	199,4	199,4	200,0	0,33%	7E-05	1,329	198,69	-0,33%	0,793	0,795	0,796	0,800	-0,86%	-0,66%	-0,46%	-2,1	-1,6	-1,1
149	210	257,2	209,4	209,4	210,0	0,31%	7E-05	1,396	208,65	-0,33%	0,833	0,835	0,836	0,840	-0,84%	-0,64%	-0,44%	-2,2	-1,7	-1,1
156	220	269,5	219,4	219,4	220,0	0,30%	7E-05	1,462	218,62	-0,33%	0,873	0,874	0,876	0,880	-0,83%	-0,63%	-0,43%	-2,2	-1,7	-1,2
163	230	281,7	229,4	229,4	230,0	0,28%	8E-05	1,529	228,59	-0,33%	0,913	0,914	0,916	0,920	-0,81%	-0,62%	-0,42%	-2,3	-1,7	-1,2
170	240	294,0	239,4	239,4	240,0	0,27%	8E-05	1,596	238,55	-0,33%	0,952	0,954	0,956	0,960	-0,80%	-0,60%	-0,40%	-2,4	-1,8	-1,2
177	250	306,2	249,4	249,4	250,0	0,26%	8E-05	1,662	248,52	-0,33%	0,992	0,994	0,996	1,000	-0,79%	-0,59%	-0,39%	-2,4	-1,8	-1,2
184	260	318,4	259,4	259,4	260,0	0,25%	9E-05	1,729	258,49	-0,33%	1,032	1,034	1,036	1,040	-0,78%	-0,58%	-0,38%	-2,5	-1,9	-1,2
191	270	330,7	269,4	269,4	270,0	0,24%	9E-05	1,796	268,45	-0,33%	1,072	1,074	1,076	1,080	-0,77%	-0,57%	-0,37%	-2,6	-1,9	-1,2
198	280	342,9	279,4	279,4	280,0	0,23%	9E-05	1,862	278,42	-0,33%	1,111	1,114	1,116	1,120	-0,76%	-0,56%	-0,37%	-2,6	-1,9	-1,3
205	290	355,2	289,4	289,4	290,0	0,22%	1E-04	1,929	288,39	-0,33%	1,151	1,154	1,156	1,160	-0,76%	-0,56%	-0,36%	-2,7	-2,0	-1,3
212	300	367,4	299,4	299,4	300,0	0,22%	1E-04	1,996	298,35	-0,33%	1,191	1,193	1,196	1,200	-0,75%	-0,55%	-0,35%	-2,7	-2,0	-1,3
219	310	379,7	309,4	309,4	310,0	0,21%	1E-04	2,062	308,32	-0,33%	1,231	1,233	1,236	1,240	-0,74%	-0,54%	-0,34%	-2,8	-2,1	-1,3
226	320	391,9	319,4	319,4	320,0	0,20%	1E-04	2,129	318,29	-0,33%	1,271	1,273	1,276	1,280	-0,73%	-0,54%	-0,34%	-2,9	-2,1	-1,3
230	325	398,1	324,4	324,4	325,0	0,20%	1E-04	2,162	323,27	-0,33%	1,290	1,293	1,296	1,300	-0,73%	-0,53%	-0,33%	-2,9	-2,1	-1,3

Selon ce tableau, dans notre cas d'études, la précision du système serait de l'ordre de 0,5% et entrainerait une erreur de mesure autour de 2V pour une tension de 230 V efficace en entrée et une capacité de 1 µF.

Nous simulons donc le circuit montré plus tôt sur LTSpice avec une tension en entrée de 325 VAC d'amplitude (230 V eff) qui est donc la tension maximale récupérable sur notre banc. Dans ces conditions, la valeur attendue aux bornes de l'amplificateur d'isolement est :

$$U_s = U_e \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 325 \cdot \frac{10}{2490 + 10} = 1{,}3\ V$$

La simulation de ce circuit indique que la tension aux bornes de l'amplificateur d'isolation est semblable à la courbe suivante :

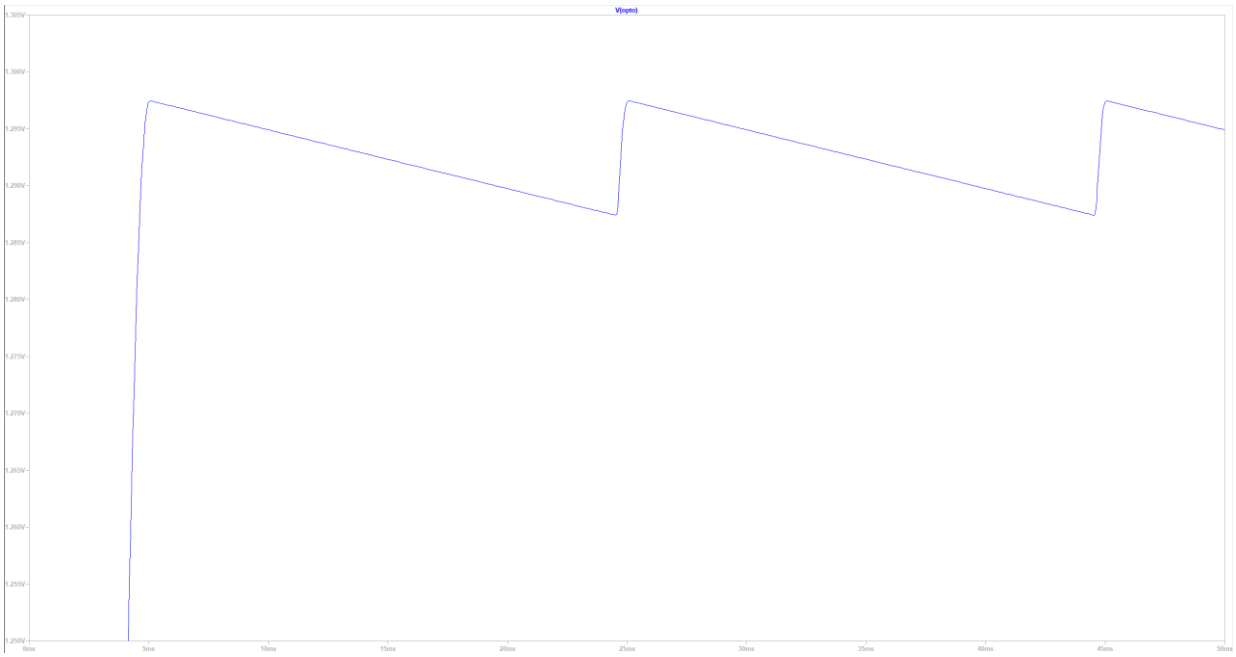
Pas de temps : 3 ms. Pas de tension : 100 mV

Avec un condensateur C1 de 1 mF, la courbe indique que la tension en sortie est parfaitement continue après 5 ms et vaut alors 1.297 V, soit 0.2% de marge d'erreur par rapport à ce qui était attendu en théorie.

Nous effectuons quelques autres tests en faisant varier la valeur de la capacité C1 pour étudier les valeurs envisageables :

- C1 = 100 µF : 1.297 V au bout de 5 ms puis oscillations très faibles autour de 1.297 V toutes les 20 ms.
- C1 = 10 µF : 1.297 V au bout de 5 ms puis oscillations entre 1.296 et 1.297 V toutes les 20 ms
- C1 = 1 µF : 1.298 V au bout de 5 ms puis oscillations entre 1.288 et 1.298 V toutes les 20 ms
- C1 = 100 nF : oscillations entre 1.213 et 1.298 V toutes les 20 ms.
- C1 = 10 nF : oscillations entre 736 mV et 1.294 V
- C1 = 1 nF : oscillations entre 6 mV et 1.292 V

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



Tension en sortie du circuit en prenant C1 = 1 µF : des oscillations apparaissent.
Pas de temps : 5 ms. Pas de tension : 5 mV.

Les données issues de ces simulations sont regroupées dans le tableau suivant :

Valeur du condensateur (F)	Tension en sortie (V)	Marge d'erreur (%)
1 m	1,297	0,2
100 µ	Oscillations autour de 1,297	0,2
10 µ	Oscillations entre 1.296 et 1.297	0,3
1 µ	Oscillations entre 1.288 et 1.298	0,5
100 n	Oscillations entre 1.213 et 1.298	3,5 en moyenne
10 n	Oscillations entre 0.736 et 1.294	28 en moyenne
1 n	Oscillations entre 0.006 et 1.292	100,3 en moyenne

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Comme nous pouvons le voir, une capacité sous-dimensionnée implique des oscillations plus ou moins importantes de la tension en sortie du circuit. Dans le cas où C1 vaut 1 µF, ces oscillations ne sont plus négligeables : la tension moyenne valant alors 1.292 V, la marge d'erreur augmente alors de 0.2% à 0.6%. Pire encore, l'utilisation d'une capacité de 100 nF ou moins provoque de grandes oscillations non négligeables qui ne permettent pas de considérer le signal comme une tension continue : le condensateur ne remplit plus son rôle.

Cependant, la tension aux bornes de cette capacité pouvant atteindre 325 V continu, il est à noter que le prix des condensateurs augmente rapidement avec leur valeur lorsque de telles tensions sont en jeu : si le coût d'une capacité de 1 µF est de l'ordre d'un euro, celui pour une capacité de 1 mF monte alors à une quinzaine d'euros. Ainsi, choisir un condensateur de 1 mF peut engendrer un coût inutile.

Les analyses précédentes ayant été faites pour des tensions de 230 V efficace en entrée, nous réalisons de nouvelles simulations pour deux autres tensions d'entrées.

- Pour un signal sinusoïdal d'amplitude 150 V (106 Veff) en entrée, nous souhaitons obtenir, idéalement, une tension en sortie de 0.6 V :

$$U_s = U_e.\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 150\,.\ \frac{10}{2490 + 10} = 600\ mV$$

Selon notre tableau, pour une telle tension en entrée, la tension moyenne en sortie doit être de 595 mV et la marge d'erreur de 0,8% environ pour une capacité de 1 µF. D'après les simulations, nous obtenons le tableau suivant une tension, après 5 ms :

Valeur du condensateur (F)	Tension en sortie (mV)	Marge d'erreur (%)
1 m	597	0,5
1 µ	Oscille entre 593 et 598	0,7
1 n	Oscille entre 0 et 596	101,3

- Pour un signal sinusoïdal d'amplitude 10 V (7 Veff), nous souhaitons obtenir, en négligeant les sources d'erreurs, une tension en sortie de 40 mV.
  En théorie, avec ces sources d'erreurs et un condensateur de 1 µF, la tension attendue est de 37,3 mV. La différence entre ces deux tensions représente un écart de 0,8 V sur les 10V d'amplitude du signal d'entrée, ce qui représente une marge d'erreur de 6,8% environ.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

D'après les simulations, nous obtenons le tableau suivant :

Valeur du condensateur (F)	Tension en sortie (mV)	Marge d'erreur (%)
1 m	37 (37.5 après 10 s)	8
1 µ	Oscille autour de 37.5	7
1 n	Oscille entre 0 et 38	110,5

Toutes ces simulations peuvent ainsi être synthétisées dans le tableau suivant indiquant la marge d'erreur à 7, 106 et 230 V efficace pour différents condensateurs :

Condensateur (F) \ Tension en entrée (V)	7	106	230
1n	110,5	101,3	100,3
1µ	7	0,7	0,5
1m	8	0,5	0,2

Marge d'erreur (%) pour différentes valeurs de capacité de filtrage à différentes tensions de référence

Comme nous l'avions dit plus tôt, un condensateur inférieur à 1 µF est sous-dimensionné et ne permet pas un filtrage de la tension suffisant. Un condensateur de 1 mF, lui, offre d'excellentes performances mais est bien plus cher lorsqu'on applique à ses bornes des tensions de plusieurs centaines de volts.

D'après ces résultats, la marge d'erreur diminue lorsque la tension augmente. Cette remarque est liée à la chute de tension aux bornes de la diode qui devient de plus en plus négligeable à mesure que la tension en entrée augmente. Ainsi, pour un condensateur de 1 µF, une marge d'erreur de 7% à 10 V implique une erreur pouvant aller jusque 0,7 V là où la marge d'erreur de 0,7% à 150 V équivaut à une erreur de 1 V : dans ces deux cas, la précision souhaitée est atteinte. Pour 325 V, l'erreur de tension serait alors de 1.625 V.

Si nous comparons ces valeurs avec les valeurs théoriques calculées dans le tableau en début de paragraphe, nous pouvons remarquer que notre modèle théorique est très proche du modèle simulé puisque :

- La tension en sortie du pont diviseur de tension avec une capacité de 1 µF est d'environ 37,5 / 595,5 / 1293 mV d'après les simulations et de 37,3 / 595,4 / 1293 mV d'après notre tableau pour les tensions étudiées qui sont 7 / 106 / 230 Vrms, ce qui représente respectivement des écarts de 0,53 / 0,02 / 0 % grâce à des mesures précises au millivolt près.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

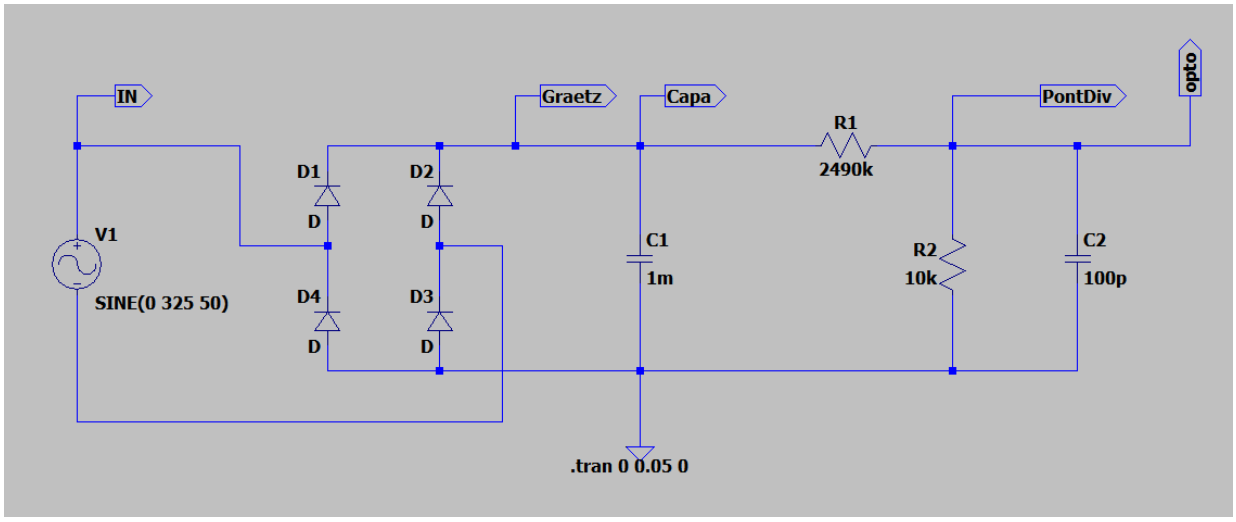
- La marge d'erreur pour un condensateur de 1 µF est de 7 / 0,7 / 0,5 % sur notre simulation et de 6,8 / 0,8 / 0,5 % sur notre tableau pour les tensions en entrée de 7, 106 et 230 Vrms respectivement.

Notre modèle théorique semble donc très proche des résultats simulés pour les trois tensions étudiées ici.

III.2.6.2.1.2 Redresseur double alternance

Dans ce chapitre, nous allons étudier le redresseur monophasé double alternance qui est le redresseur utilisé pour notre premier prototype. Contrairement à ce dernier, le bloc redresseur sera donc placé en amont du pont diviseur de tension et permettra donc d'avoir de bien meilleures performances.

Contrairement au redresseur simple alternance, celui-ci est constitué d'un pont de 4 diodes permettant de récupérer les alternances négatives et donc de multiplier par deux la fréquence de signal en sortie du pont de diodes.



Circuit avec le pont de diodes

Si l'ajout d'une diode augmente la chute de tension présente entre l'entrée et la sortie du redresseur, la fréquence dédoublée du signal permet de réduire la tension de ronflement après le filtrage du condensateur puisque les cycles de rechargement de la capacité se répètent deux fois plus souvent.

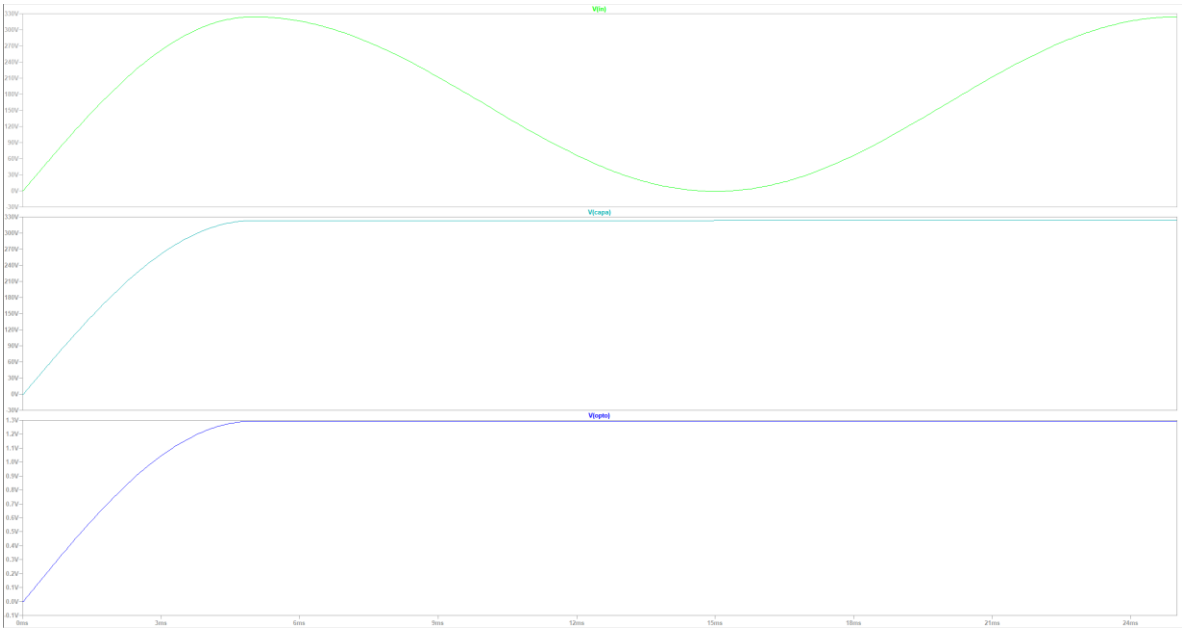
Le tableau de mesures calculant les tensions théoriques en sortie du circuit en prenant en compte les sources d'erreur est le suivant :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

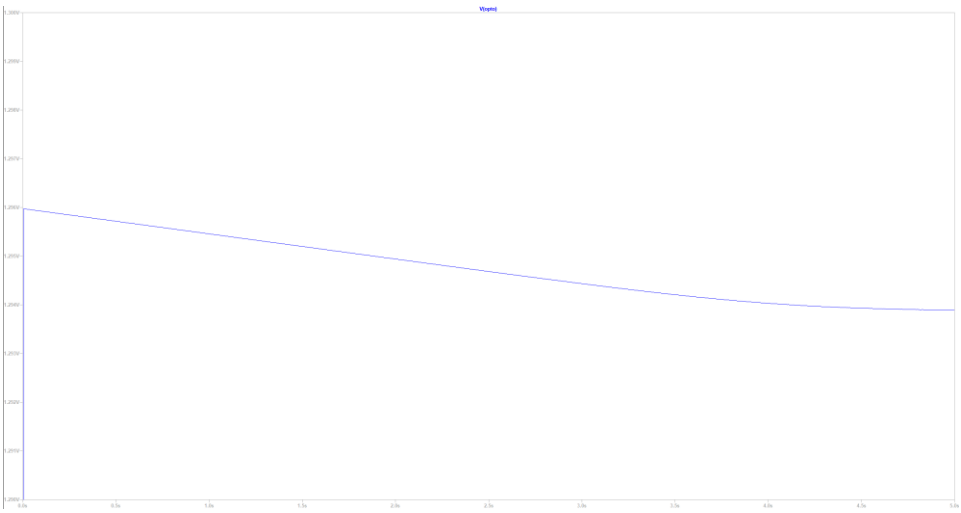
Source de tensions :			Redresseur : chute de tension				Condensateur : Tension de ronflement				Tensions après Pont diviseur de tension (V) :				Erreur PDdT (%)			Ecart entre tension calculée et tension parfaite (V) :		
Ue mono eff (V)	Ue mono ampl (V)	Ue tri eff (V)	drop volt (V)	Uredress (V)	Uredress théo (V)	Erreur (%)	I (A)	dU (V)	Umoy (V)	% err	min (x0,998	normal (x1)	max (x1,002)	Théorique	min	norm	max	min	norm	max
7	10	12,2	8,9	8,9	10,0	12,36%	3E-06	0,030	8,89	-0,17%	0,035	0,036	0,036	0,040	-11,33%	-11,15%	-10,97%	-1,4	-1,4	-1,3
14	20	24,5	18,9	18,9	20,0	5,82%	6E-06	0,063	18,87	-0,17%	0,075	0,075	0,076	0,080	-5,85%	-5,66%	-5,47%	-1,4	-1,4	-1,3
21	30	36,7	28,9	28,9	30,0	3,81%	1E-05	0,096	28,85	-0,17%	0,115	0,115	0,116	0,120	-4,02%	-3,83%	-3,63%	-1,5	-1,4	-1,3
28	40	49,0	38,9	38,9	40,0	2,83%	1E-05	0,130	38,84	-0,17%	0,155	0,155	0,156	0,160	-3,11%	-2,91%	-2,72%	-1,5	-1,4	-1,3
35	50	61,2	48,9	48,9	50,0	2,25%	2E-05	0,163	48,82	-0,17%	0,195	0,195	0,196	0,200	-2,56%	-2,36%	-2,17%	-1,6	-1,4	-1,3
42	60	73,5	58,9	58,9	60,0	1,87%	2E-05	0,196	58,80	-0,17%	0,235	0,235	0,236	0,240	-2,19%	-2,00%	-1,80%	-1,6	-1,5	-1,3
50	70	85,7	68,9	68,9	70,0	1,60%	2E-05	0,230	68,79	-0,17%	0,275	0,275	0,276	0,280	-1,93%	-1,74%	-1,54%	-1,7	-1,5	-1,3
57	80	98,0	78,9	78,9	80,0	1,39%	3E-05	0,263	78,77	-0,17%	0,314	0,315	0,316	0,320	-1,74%	-1,54%	-1,34%	-1,7	-1,5	-1,3
64	90	110,2	88,9	88,9	90,0	1,24%	3E-05	0,296	88,75	-0,17%	0,354	0,355	0,356	0,360	-1,58%	-1,39%	-1,19%	-1,7	-1,5	-1,3
71	100	122,5	98,9	98,9	100,0	1,11%	3E-05	0,330	98,74	-0,17%	0,394	0,395	0,396	0,400	-1,46%	-1,26%	-1,07%	-1,8	-1,5	-1,3
78	110	134,7	108,9	108,9	110,0	1,01%	4E-05	0,363	108,72	-0,17%	0,434	0,435	0,436	0,440	-1,36%	-1,17%	-0,97%	-1,8	-1,6	-1,3
85	120	147,0	118,9	118,9	120,0	0,93%	4E-05	0,396	118,70	-0,17%	0,474	0,475	0,476	0,480	-1,28%	-1,08%	-0,88%	-1,9	-1,6	-1,3
92	130	159,2	128,9	128,9	130,0	0,85%	4E-05	0,430	128,69	-0,17%	0,514	0,515	0,516	0,520	-1,21%	-1,01%	-0,81%	-1,9	-1,6	-1,3
99	140	171,5	138,9	138,9	140,0	0,79%	5E-05	0,463	138,67	-0,17%	0,554	0,555	0,556	0,560	-1,15%	-0,95%	-0,75%	-2,0	-1,6	-1,3
106	150	183,7	148,9	148,9	150,0	0,74%	5E-05	0,496	148,65	-0,17%	0,593	0,595	0,596	0,600	-1,10%	-0,90%	-0,70%	-2,0	-1,7	-1,3
113	160	196,0	158,9	158,9	160,0	0,69%	5E-05	0,530	158,64	-0,17%	0,633	0,635	0,636	0,640	-1,05%	-0,85%	-0,65%	-2,1	-1,7	-1,3
120	170	208,2	168,9	168,9	170,0	0,65%	6E-05	0,563	168,62	-0,17%	0,673	0,674	0,676	0,680	-1,01%	-0,81%	-0,61%	-2,1	-1,7	-1,3
127	180	220,5	178,9	178,9	180,0	0,61%	6E-05	0,596	178,60	-0,17%	0,713	0,714	0,716	0,720	-0,98%	-0,78%	-0,58%	-2,1	-1,7	-1,3
134	190	232,7	188,9	188,9	190,0	0,58%	6E-05	0,630	188,59	-0,17%	0,753	0,754	0,756	0,760	-0,94%	-0,74%	-0,55%	-2,2	-1,7	-1,3
141	200	245,0	198,9	198,9	200,0	0,55%	7E-05	0,663	198,57	-0,17%	0,793	0,794	0,796	0,800	-0,91%	-0,72%	-0,52%	-2,2	-1,8	-1,3
149	210	257,2	208,9	208,9	210,0	0,53%	7E-05	0,696	208,55	-0,17%	0,833	0,834	0,836	0,840	-0,89%	-0,69%	-0,49%	-2,3	-1,8	-1,3
156	220	269,5	218,9	218,9	220,0	0,50%	7E-05	0,730	218,54	-0,17%	0,872	0,874	0,876	0,880	-0,86%	-0,67%	-0,47%	-2,3	-1,8	-1,3
163	230	281,7	228,9	228,9	230,0	0,48%	8E-05	0,763	228,52	-0,17%	0,912	0,914	0,916	0,920	-0,84%	-0,64%	-0,45%	-2,4	-1,8	-1,3
170	240	294,0	238,9	238,9	240,0	0,46%	8E-05	0,796	238,50	-0,17%	0,952	0,954	0,956	0,960	-0,82%	-0,62%	-0,43%	-2,4	-1,8	-1,3
177	250	306,2	248,9	248,9	250,0	0,44%	8E-05	0,830	248,49	-0,17%	0,992	0,994	0,996	1,000	-0,80%	-0,61%	-0,41%	-2,5	-1,9	-1,2
184	260	318,4	258,9	258,9	260,0	0,42%	9E-05	0,863	258,47	-0,17%	1,032	1,034	1,036	1,040	-0,79%	-0,59%	-0,39%	-2,5	-1,9	-1,2
191	270	330,7	268,9	268,9	270,0	0,41%	9E-05	0,896	268,45	-0,17%	1,072	1,074	1,076	1,080	-0,77%	-0,57%	-0,37%	-2,6	-1,9	-1,2
198	280	342,9	278,9	278,9	280,0	0,39%	9E-05	0,930	278,44	-0,17%	1,112	1,114	1,116	1,120	-0,76%	-0,56%	-0,36%	-2,6	-1,9	-1,2
205	290	355,2	288,9	288,9	290,0	0,38%	1E-04	0,963	288,42	-0,17%	1,151	1,154	1,156	1,160	-0,74%	-0,55%	-0,35%	-2,6	-1,9	-1,2
212	300	367,4	298,9	298,9	300,0	0,37%	1E-04	0,996	298,40	-0,17%	1,191	1,194	1,196	1,200	-0,73%	-0,53%	-0,33%	-2,7	-2,0	-1,2
219	310	379,7	308,9	308,9	310,0	0,36%	1E-04	1,030	308,39	-0,17%	1,231	1,234	1,236	1,240	-0,72%	-0,52%	-0,32%	-2,7	-2,0	-1,2
226	320	391,9	318,9	318,9	320,0	0,34%	1E-04	1,063	318,37	-0,17%	1,271	1,273	1,276	1,280	-0,71%	-0,51%	-0,31%	-2,8	-2,0	-1,2
230	325	398,1	323,9	323,9	325,0	0,34%	1E-04	1,080	323,36	-0,17%	1,291	1,293	1,296	1,300	-0,70%	-0,50%	-0,31%	-2,8	-2,0	-1,2

Tout d'abord, nous nous plaçons dans les conditions matérielles prévues initialement en utilisant un condensateur de 1 mF. La tension aux bornes de l'ACPL-C87B-000E est alors la suivante :



Tension en entrée du circuit, tension après le condensateur de filtrage et tension après le pont diviseur de tension
Pas de temps : 3 ms

Comme nous pouvons le voir, la tension en sortie de ce circuit est une tension continue de valeur 1.296 V après 5 ms. Cependant, la tension en sortie chute à 1.294 V après 5 s comme nous pouvons le voir sur la courbe suivante :

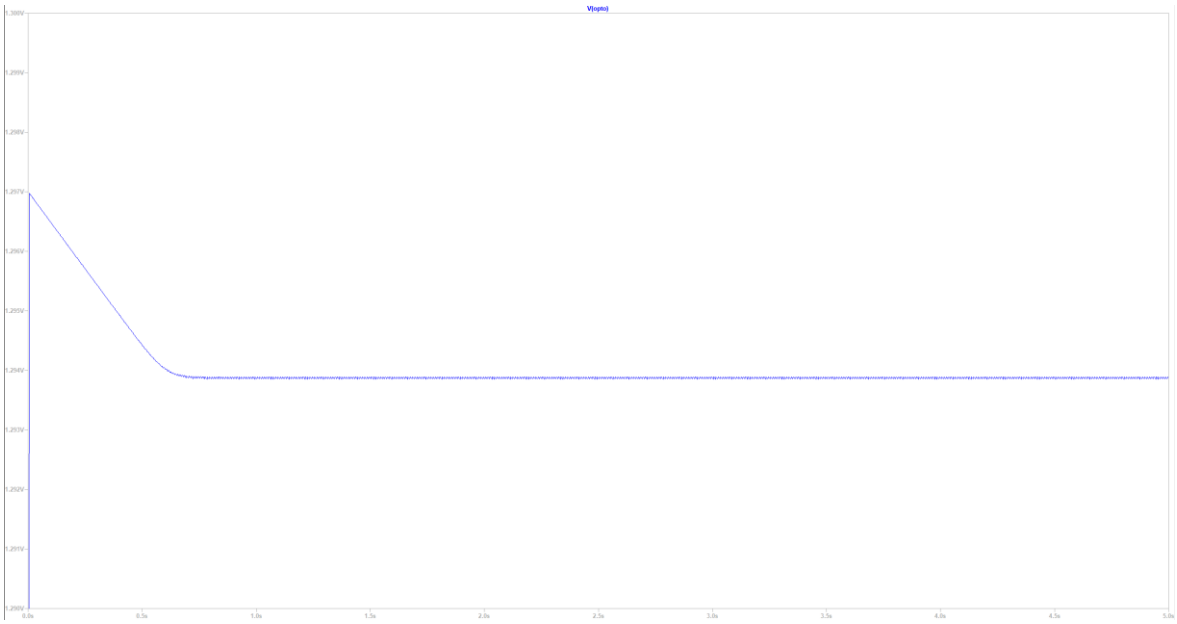


Pas de temps : 500 ms. Pas de tension : 1 mV

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

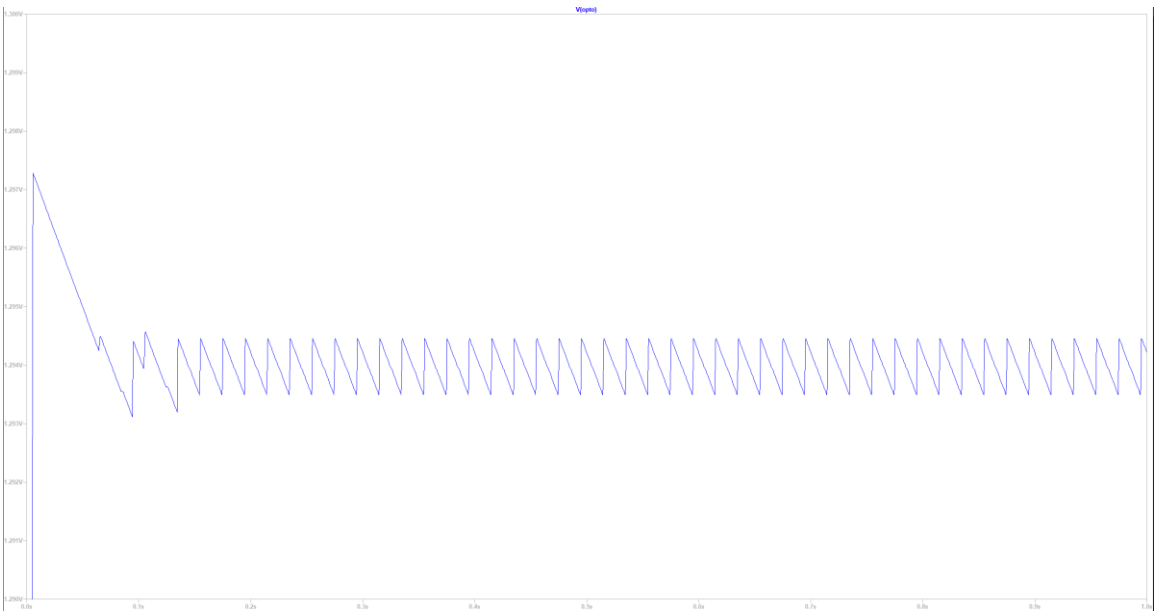
L'ajout des diodes a donc pour conséquences une perte de précision en considérant un même condensateur de 1 mF. Comme précédemment, nous étudions donc l'impact de la valeur de cette capacité pour ce circuit :

- C1 = 100 µF : la tension monte à 1.297 V et redescend autour de 1.294 V après 0.5 s où elle oscille de manière imperceptible par le système.



Pas de temps : 500 ms. Pas de tension : 1 mV.

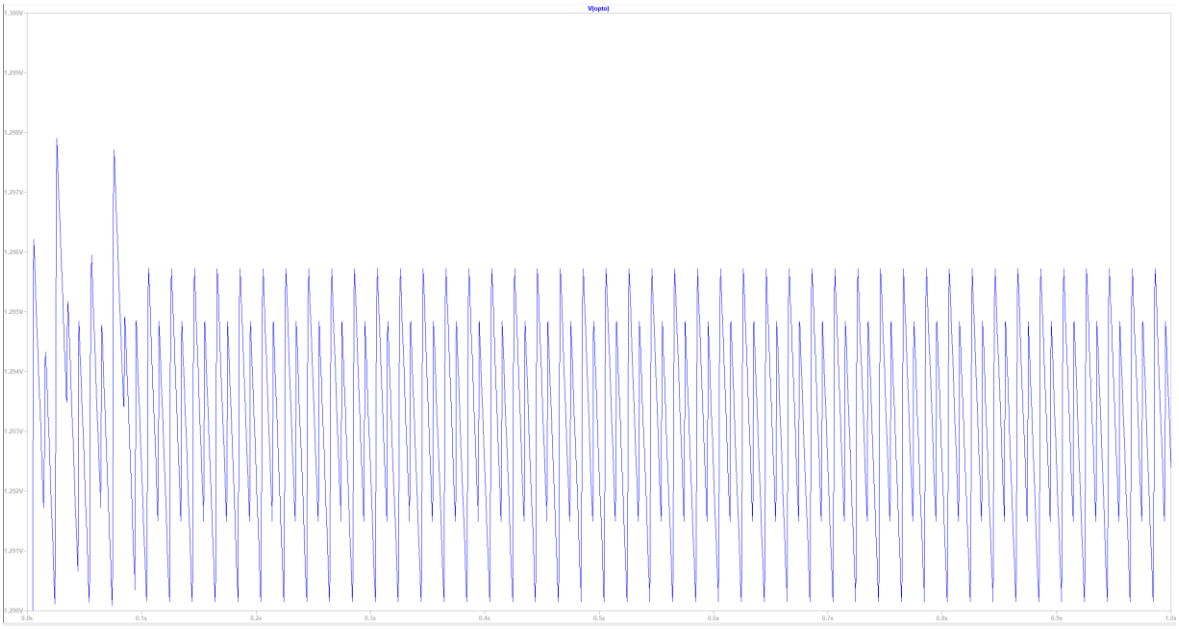
- C1 = 10 µF : La tension atteint 1.297 V puis oscille autour de 1.294 V après 100 ms. L'erreur moyenne est alors de 0,4%.



Pas de temps : 100 ms. Pas de tension : 1 mV.

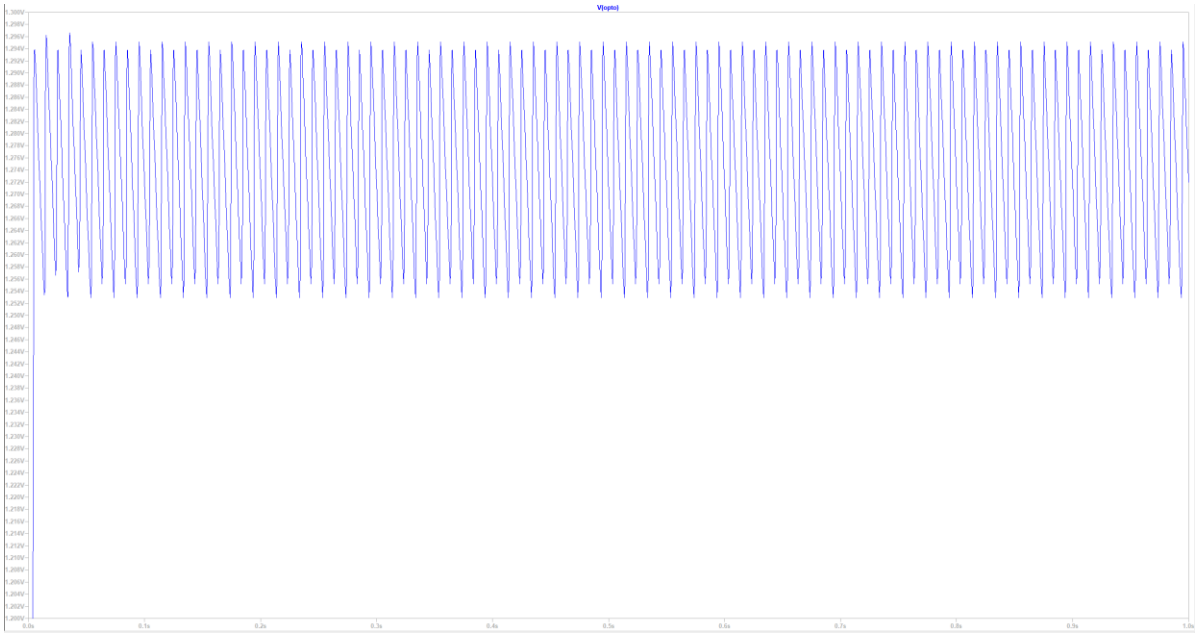
Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

- C1 = 1 µF : La tension oscille entre 1.290 et 1.296 V : la marge d'erreur moyenne est alors de 0,5%.



Pas de temps : 100 ms. Pas de tension : 1 mV.

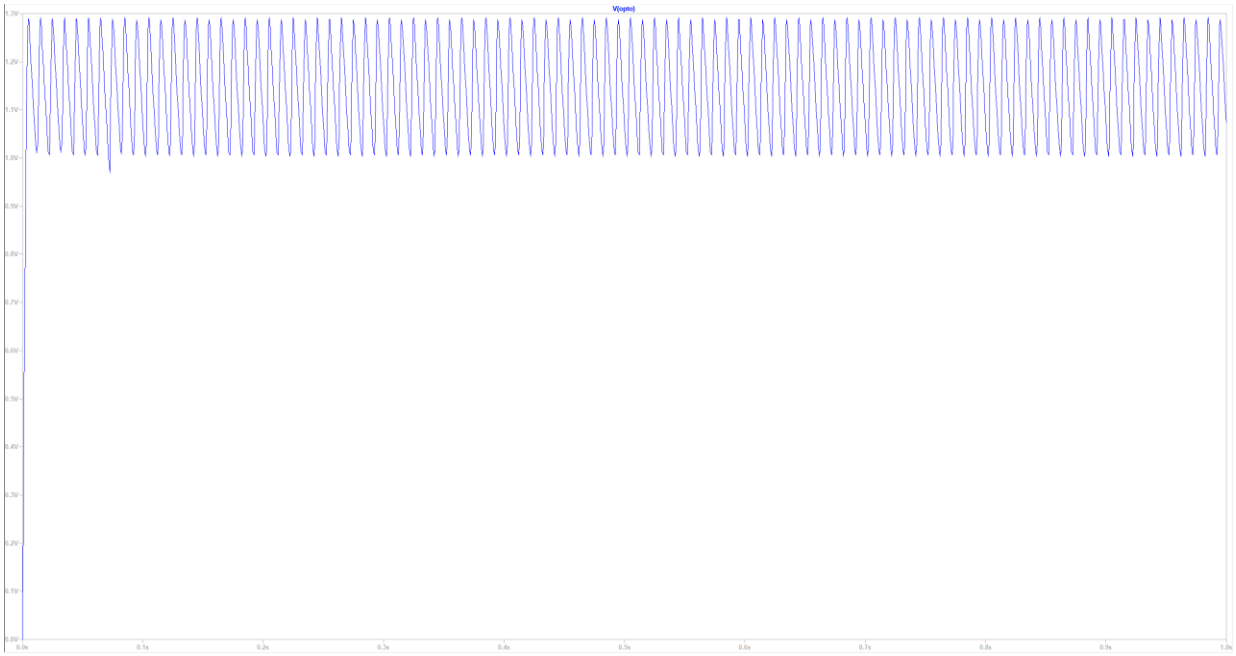
- C1 = 100 nF : la tension oscille entre 1.253 et 1.295 V approximativement. La tension moyenne est donc de 1.27 V, ce qui représente une marge d'erreur de 2,4%.



Tension en sortie du circuit. Courbe comprise entre 1.2 et 1.3 V.
Pas de temps : 100 ms. Pas de tension : 2 mV.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

- C1 = 10 nF : la tension en sortie oscille entre 0.975 et 1.293 V. La tension moyenne est donc de 1.134 V ce qui représente une erreur de 14,6% en moyenne.



Tension en sortie, comprise entre 0 et 1.3 V.
Pas de temps : 100 ms. Pas de tension : 100 mV.

Nous pouvons ainsi regrouper le résultat de ces différentes simulations dans un tableau tel que celui-ci :

Condensateur C1 (F)	1 m	100 µ	10 µ	1 µ	100 n	10 n	1n
Tension moyenne en sortie (V)	1.295	1.294	1.294	1.293	1.274	1.134	0,783
Marge d'erreur en moyenne (%)	0,4	0,5	0,5	0,5	2	14,6	65,4

Tableau des tensions aux bornes de l'optocoupleur lorsque Ue = 230 Veff

Si, pour une valeur comprise entre 1 µ et 1 mF, la valeur choisie pour le condensateur influence peu la précision du système, cette dernière est fortement impactée pour des capacités de plus faibles valeurs.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Ainsi, il est possible de descendre C1 jusque 1 µF où la tension oscille entre 1.290 V et 1.296 V. Pour cette solution, nous choisirions donc une capacité C1 = 1 µF.

Pour un signal sinusoïdal d'amplitude 150 V (106 Veff), nous souhaitons obtenir, en théorie, une tension en sortie de 0.6 V. D'après les simulations, nous obtenons après 5 ms les tensions suivantes :

- Pour une capacité de 1 nF : une tension oscillant entre 0,123 V et 0,595 V, soit une erreur de 67,1%
- Pour une capacité de 1 µF : une tension oscillant entre 0.593 V et 0,596 V, soit 1,01% d'erreur
- Pour une capacité de 1 mF : une tension continue de 0.594 V. La marge d'erreur est alors de 1,01%

Pour un signal sinusoïdal d'amplitude 10 V (7 Veff), nous souhaitons obtenir, en théorie, une tension en sortie de 40 mV. D'après les simulations, nous obtenons une tension qui :

- Pour une capacité de 1 nF : oscille entre 7 et 36 mV après 5 ms
- Pour une capacité de 1 µF : oscille de manière imperceptible autour de 35 mV après 5 ms
- Pour une capacité de 1 mF : atteint 35 mV après un peu moins d'une demie seconde

Condensateur (F) \ Tension en entrée (V)	7	106	230
1n	86	66,7	65,4
1µ	14,3	1,01	0,5
1m	14,3	1,01	0,4

Marge d'erreur (%) entre le cas idéal et les mesures relevées dans les différentes simulations

Si nous comparons ces valeurs avec les valeurs théoriques calculées dans le tableau en début de paragraphe, nous pouvons remarquer que notre modèle théorique est très proche du modèle simulé puisque :

- La tension en sortie du pont diviseur de tension avec une capacité de 1 µF est d'environ 35 / 594,5 / 1293 mV d'après les simulations et de 35,5 / 594,6 / 1293 mV d'après notre tableau pour les tensions étudiées qui sont 7 / 106 / 230 Vrms respectivement soit un écart quasi nul.

- La marge d'erreur pour un condensateur de 1 µF est de 14,3 / 1 / 0,5 % sur notre simulation et de 11,2 / 0,9 / 0,5 % sur notre tableau pour les tensions en entrée de 7, 106 et 230 Vrms respectivement.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Si notre modèle est extrêmement proche pour les tensions de 106 et 230 Vrms, nous pouvons cependant noter un écart de 3% sur la marge d'erreur pour une tension de 7 Vrms : cet écart représente une différence de 1 mV sur la valeur finale qui peut être due à une lecture des résultats de la simulation pas suffisamment précise. Cet écart représente une différence de tension de 200 mV en entrée du circuit ce qui est fortement négligeable au regard de la précision désirée pour ce système.

L'avantage et l'inconvénient de ce système est l'utilisation d'un pont de diodes qui utilise à chaque instant deux diodes en séries : la fréquence du signal est alors doublée et la tension de ronflement est donc réduite, mais la chute de tension est alors plus importante ce qui a des répercutions sur la précision du système, surtout à très basse tension.

D'après notre tableau de calculs, la différence de tension entre le cas parfait et le cas réel est :

- de 0,8 V avec le redresseur simple alternance et de 1,4 V avec le redresseur à double alternance pour une tension de 10 V d'amplitude maximale
- de 2,1 V avec le redresseur simple alternance et de 2 V avec le redresseur à double alternance pour une tension de 325 V d'amplitude maximale

Ainsi, cette solution n'est meilleure qu'après des tensions de plus de 300 V d'amplitude maximale et la différence est alors très faible. L'intérêt de cette solution repose alors sur une tension de ronflement deux fois plus faible permettant d'avoir une tension en sortie plus stable qu'avec le redresseur simple alternance, ce qui n'est pas suffisant pour choisir ce redresseur.

Les deux redresseurs étudiés pour des tensions monophasés ont montré une précision assez faible pour des tensions de plus de 200 V avec une précision pouvant atteindre +/- 2V. Bien que la contrainte des 1% de précision exigée par le cahier des charges soit respectée, nous allons ensuite étudier des redresseurs triphasés pour obtenir de meilleures performances.

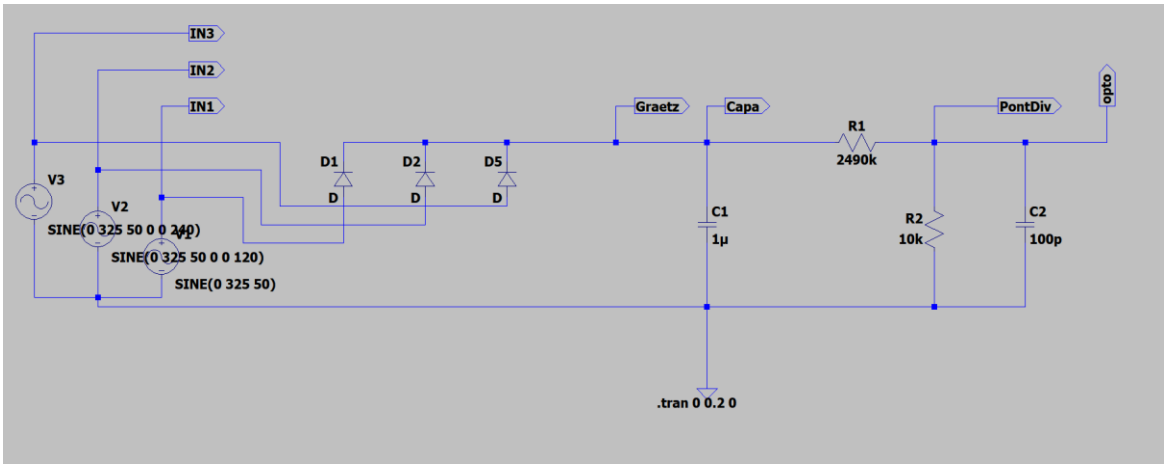
Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.2.6.2.2 CAS TRIPHASE

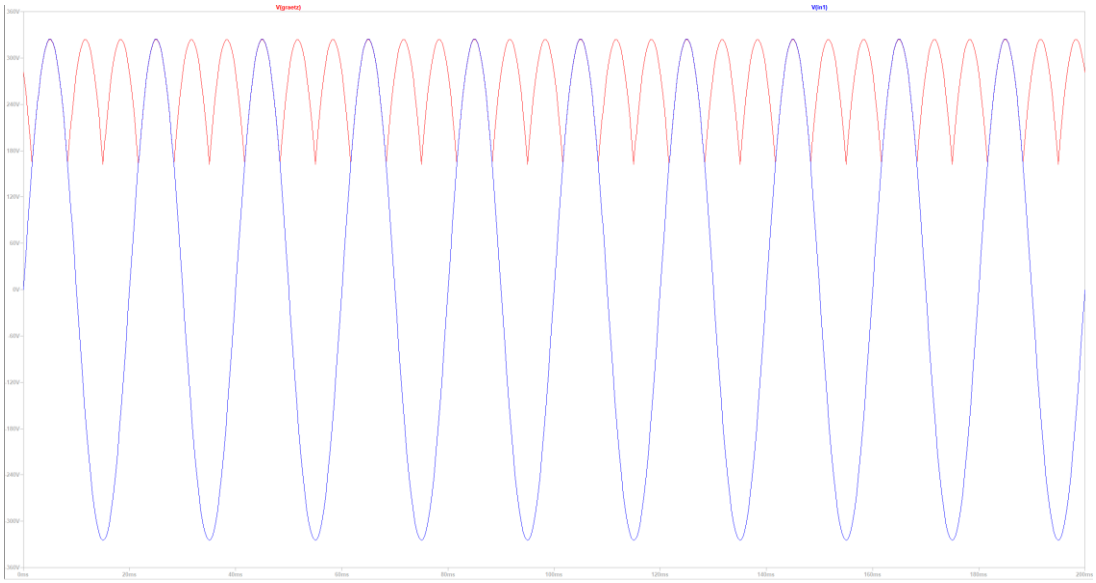
Puisque nous avons à notre disposition le réseau triphasé avec neutre distribué, nous pouvons étudier le comportement du système en utilisant les redresseurs simple et double alternance dans le cas triphasé.

III.2.6.2.2.1 Redresseur triphasé simple alternance

Le redresseur triphasé simple alternance repose, comme sa version en monophasé, sur l'utilisation d'une diode sur chaque phase. Dans ce cas, la tension redressée est celle entre phase et neutre et devrait donc atteindre 325 V comme dans les deux derniers cas.



Cependant, puisque nous redressons les alternances positives des trois phases, la fréquence en sortie du redresseur est de 150 Hz, permettant d'avoir une tension élevée plus souvent qu'en monophasé double alternance tout en ayant qu'une seule diode et donc une chute de tension aussi faible qu'avec le redresseur monophasé simple alternance.



Tension entre une des phases et le neutre en bleu et tension simulée en sortie du redresseur en rouge. Pas de temps : 20 ms. Pas de tension : 60 V.

Tout comme dans les deux premiers cas, nous réalisons un tableau de mesures théoriques estimant les erreurs de mesures par rapport au cas idéal utilisé lors de l'élaboration du premier prototype. Ces erreurs sont là encore la chute de tension due à la diode (0,65 V dans notre exemple), la prise en compte de la tension de ronflement et de la tolérance des résistances.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Dans le tableau suivant, la valeur de la capacité de filtrage est 1 µF comme pour les deux cas précédents. Comme nous pouvons le voir, la différence de tension avec le cas idéal est alors entre 0,8 et 1,2V ce qui est bien meilleur que les deux premières solutions étudiées :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Source de tensions :			Redresseur : chute de tension				Condensateur : Tension de ronflement				Tensions après Pont diviseur de tension (V) :				Erreur PDdT (%)			Ecart entre tension calculée et tension parfaite (V) :		
Ue mono eff (V)	Ue mono ampl (V)	Ue tri eff (V)	drop volt (V)	Uredress (V)	Uredress théo (V)	Erreur (%)	I (A)	dU (V)	Umoy (V)	% err	min (x0,998)	normal (x1)	max (x1,002)	Théorique	min	norm	max	min	norm	max
7	10	12,2	9,4	9,4	10,0	6,95%	3E-06	0,021	9,34	-0,11%	0,037	0,037	0,037	0,040	-6,79%	-6,60%	-6,42%	-0,8	-0,8	-0,8
14	20	24,5	19,4	19,4	20,0	3,36%	6E-06	0,043	19,33	-0,11%	0,077	0,077	0,077	0,080	-3,55%	-3,36%	-3,16%	-0,9	-0,8	-0,8
21	30	36,7	29,4	29,4	30,0	2,21%	1E-05	0,065	29,32	-0,11%	0,117	0,117	0,118	0,120	-2,47%	-2,28%	-2,08%	-0,9	-0,8	-0,8
28	40	49,0	39,4	39,4	40,0	1,65%	1E-05	0,087	39,31	-0,11%	0,157	0,157	0,158	0,160	-1,93%	-1,73%	-1,54%	-0,9	-0,8	-0,8
35	50	61,2	49,4	49,4	50,0	1,32%	2E-05	0,110	49,30	-0,11%	0,197	0,197	0,198	0,200	-1,61%	-1,41%	-1,21%	-1,0	-0,9	-0,7
42	60	73,5	59,4	59,4	60,0	1,10%	2E-05	0,132	59,28	-0,11%	0,237	0,237	0,238	0,240	-1,39%	-1,19%	-1,00%	-1,0	-0,9	-0,7
50	70	85,7	69,4	69,4	70,0	0,94%	2E-05	0,154	69,27	-0,11%	0,277	0,277	0,278	0,280	-1,24%	-1,04%	-0,84%	-1,1	-0,9	-0,7
57	80	98,0	79,4	79,4	80,0	0,82%	3E-05	0,176	79,26	-0,11%	0,316	0,317	0,318	0,320	-1,12%	-0,92%	-0,72%	-1,1	-0,9	-0,7
64	90	110,2	89,4	89,4	90,0	0,73%	3E-05	0,199	89,25	-0,11%	0,356	0,357	0,358	0,360	-1,03%	-0,83%	-0,63%	-1,1	-0,9	-0,7
71	100	122,5	99,4	99,4	100,0	0,65%	3E-05	0,221	99,24	-0,11%	0,396	0,397	0,398	0,400	-0,96%	-0,76%	-0,56%	-1,2	-0,9	-0,7
78	110	134,7	109,4	109,4	110,0	0,59%	4E-05	0,243	109,23	-0,11%	0,436	0,437	0,438	0,440	-0,90%	-0,70%	-0,50%	-1,2	-0,9	-0,7
85	120	147,0	119,4	119,4	120,0	0,54%	4E-05	0,265	119,22	-0,11%	0,476	0,477	0,478	0,480	-0,85%	-0,65%	-0,45%	-1,3	-1,0	-0,7
92	130	159,2	129,4	129,4	130,0	0,50%	4E-05	0,287	129,21	-0,11%	0,516	0,517	0,518	0,520	-0,81%	-0,61%	-0,41%	-1,3	-1,0	-0,7
99	140	171,5	139,4	139,4	140,0	0,47%	5E-05	0,310	139,20	-0,11%	0,556	0,557	0,558	0,560	-0,77%	-0,57%	-0,38%	-1,3	-1,0	-0,6
106	150	183,7	149,4	149,4	150,0	0,44%	5E-05	0,332	149,18	-0,11%	0,596	0,597	0,598	0,600	-0,74%	-0,54%	-0,35%	-1,4	-1,0	-0,6
113	160	196,0	159,4	159,4	160,0	0,41%	5E-05	0,354	159,17	-0,11%	0,635	0,637	0,638	0,640	-0,72%	-0,52%	-0,32%	-1,4	-1,0	-0,6
120	170	208,2	169,4	169,4	170,0	0,38%	6E-05	0,376	169,16	-0,11%	0,675	0,677	0,678	0,680	-0,69%	-0,49%	-0,29%	-1,4	-1,0	-0,6
127	180	220,5	179,4	179,4	180,0	0,36%	6E-05	0,399	179,15	-0,11%	0,715	0,717	0,718	0,720	-0,67%	-0,47%	-0,27%	-1,5	-1,0	-0,6
134	190	232,7	189,4	189,4	190,0	0,34%	6E-05	0,421	189,14	-0,11%	0,755	0,757	0,758	0,760	-0,65%	-0,45%	-0,25%	-1,5	-1,1	-0,6
141	200	245,0	199,4	199,4	200,0	0,33%	7E-05	0,443	199,13	-0,11%	0,795	0,797	0,798	0,800	-0,63%	-0,44%	-0,24%	-1,6	-1,1	-0,6
149	210	257,2	209,4	209,4	210,0	0,31%	7E-05	0,465	209,12	-0,11%	0,835	0,836	0,838	0,840	-0,62%	-0,42%	-0,22%	-1,6	-1,1	-0,6
156	220	269,5	219,4	219,4	220,0	0,30%	7E-05	0,487	219,11	-0,11%	0,875	0,876	0,878	0,880	-0,61%	-0,41%	-0,21%	-1,6	-1,1	-0,6
163	230	281,7	229,4	229,4	230,0	0,28%	8E-05	0,510	229,10	-0,11%	0,915	0,916	0,918	0,920	-0,59%	-0,39%	-0,19%	-1,7	-1,1	-0,5
170	240	294,0	239,4	239,4	240,0	0,27%	8E-05	0,532	239,08	-0,11%	0,954	0,956	0,958	0,960	-0,58%	-0,38%	-0,18%	-1,7	-1,1	-0,5
177	250	306,2	249,4	249,4	250,0	0,26%	8E-05	0,554	249,07	-0,11%	0,994	0,996	0,998	1,000	-0,57%	-0,37%	-0,17%	-1,7	-1,1	-0,5
184	260	318,4	259,4	259,4	260,0	0,25%	9E-05	0,576	259,06	-0,11%	1,034	1,036	1,038	1,040	-0,56%	-0,36%	-0,16%	-1,8	-1,1	-0,5
191	270	330,7	269,4	269,4	270,0	0,24%	9E-05	0,599	269,05	-0,11%	1,074	1,076	1,078	1,080	-0,55%	-0,35%	-0,15%	-1,8	-1,2	-0,5
198	280	342,9	279,4	279,4	280,0	0,23%	9E-05	0,621	279,04	-0,11%	1,114	1,116	1,118	1,120	-0,54%	-0,34%	-0,14%	-1,9	-1,2	-0,5
205	290	355,2	289,4	289,4	290,0	0,22%	1E-04	0,643	289,03	-0,11%	1,154	1,156	1,158	1,160	-0,53%	-0,34%	-0,14%	-1,9	-1,2	-0,5
212	300	367,4	299,4	299,4	300,0	0,22%	1E-04	0,665	299,02	-0,11%	1,194	1,196	1,198	1,200	-0,53%	-0,33%	-0,13%	-1,9	-1,2	-0,5
219	310	379,7	309,4	309,4	310,0	0,21%	1E-04	0,687	309,01	-0,11%	1,234	1,236	1,238	1,240	-0,52%	-0,32%	-0,12%	-2,0	-1,2	-0,5
226	320	391,9	319,4	319,4	320,0	0,20%	1E-04	0,710	319,00	-0,11%	1,273	1,276	1,279	1,280	-0,51%	-0,31%	-0,11%	-2,0	-1,2	-0,4
230	325	398,1	324,4	324,4	325,0	0,20%	1E-04	0,721	323,99	-0,11%	1,293	1,296	1,299	1,300	-0,51%	-0,31%	-0,11%	-2,0	-1,2	-0,4

Afin de vérifier ce modèle, nous réalisons donc de nouvelles simulations du circuit montré plus haut pour des tensions d'amplitude 10, 150 et 325 V sur les trois générateurs déphasées de 2π/3 en observant le signal en sortie avec différentes capacités de filtrage comme nous l'avions fait auparavant. Les tensions aux bornes de la capacité C2 sont répertoriées dans le tableau suivant :

Condensateur (F) \ Tension en entrée (V)	7	106	230
1n	Oscille entre 0,019 et 0,038	Oscille entre 0,315 et 0,5955	Oscille entre 0,690 et 1,293
1µ	Oscille entre 0,0366 et 0,0377	Oscille entre 0,596 et 0,5975	Oscille entre 1,2945 et 1,2975
1m	0,0375	0,597	1,298

Tensions (V) aux bornes de l'amplificateur d'isolement relevées dans les simulations pour différentes tensions d'entrées et différentes capacités de filtrage

Les marges d'erreurs obtenues par rapport aux valeurs idéales, qui sont 40 mV, 600 mV et 1.3 V, sont réunies dans le tableau suivant :

Condensateur (F) \ Tension en entrée (V)	7	106	230
1n	40,4	31,8	31,1
1µ	7,7	0,5	0,3
1m	6,7	0,5	0,1

Marge d'erreur (%) entre le modèle idéal et les valeurs relevées dans les simulations

Comme nous pouvons le voir, la précision d'un système utilisant ce type de redresseur est excellente pour des condensateurs de 1 µF ou plus. Comparé à notre modèle théorique utilisant une capacité de filtrage de 1 µF, nous avons :

- Une tension en sortie du pont diviseur de tension d'environ 37 / 597 / 1296 mV d'après les simulations ET d'après notre tableau pour les tensions étudiées qui sont 7 / 106 / 230 Vrms. Le modèle du tableau semble donc validé par ces simulations au millivolt près.

- une marge d'erreur par rapport au cas idéal de 7,7 / 0,5 / 0,3 % sur ces simulations contre 6,6 / 0,5 / 0,3 % sur notre tableau de calculs : nous pouvons en déduire que notre modèle correspond là encore au modèle de ces simulations. Cette solution nous permet donc d'avoir une erreur très faible par rapport au cas idéal avec une erreur de l'ordre du volt qui atteint donc la précision maximale de nos afficheurs, même à plus de 200 Vrms.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

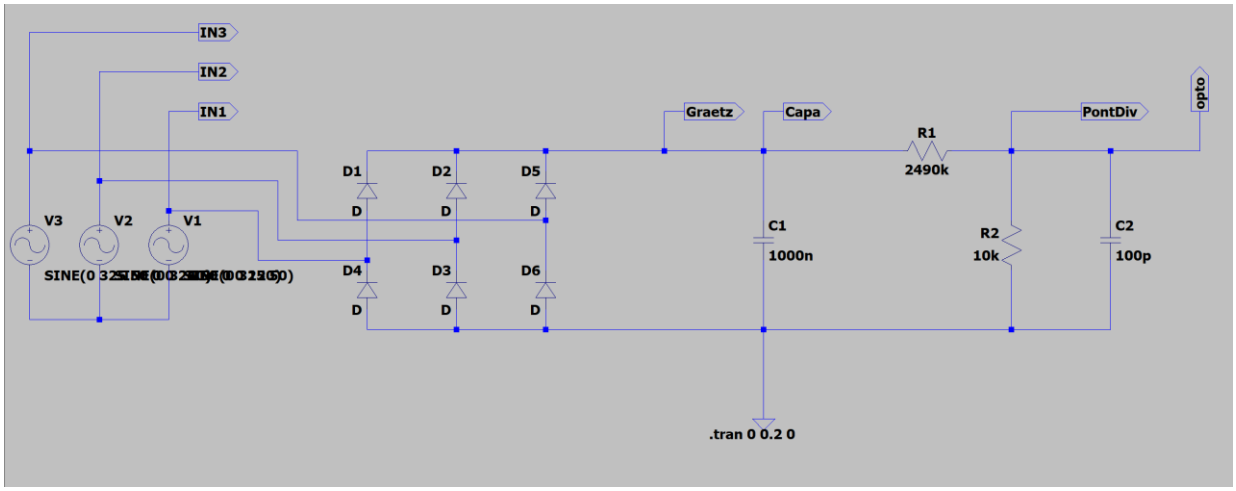
L'avantage de ce redresseur est, comme pour le redresseur monophasé simple alternance, l'utilisation d'une seule diode qui limite la chute de tension entre l'entrée et la sortie du bloc redresseur. Puisque nous utilisons du triphasé, la fréquence du signal redressé n'est pas de 50 Hz mais de 150 Hz, soit une fréquence plus grande encore que lors de l'utilisation d'un redresseur monophasé double alternance : la tension de ronflement s'en retrouve donc réduite et la tension finale plus précise.

L'inconvénient de ce système est l'utilisation du triphasé et du neutre qui nécessite donc un neutre distribué et 4 bornes sur la carte électronique pour récupérer les différents signaux. Il peut être intéressant d'utiliser un sectionneur en entrée du système pour plus de sécurité lors de maintenances du système et couper en amont les 3 phases : l'ajout d'un sectionneur engendre alors un coût supplémentaire pour cette solution.

Ce type de redresseur permet donc de cumuler les avantages des deux précédentes solutions étudiées mais nécessite un bornier supplémentaire et un sectionneur qui engendrent des coûts supplémentaires. La précision du système est alors excellente et permettrait de garantir une erreur de +/- 1V pour des tensions d'entrées de 10 à 325 V d'amplitude maximale avec un temps de réponse très court.

III.2.6.2.2.2 Redresseur triphasé double alternance

Ce redresseur permet, comme pour le redresseur monophasé simple alternance, d'utiliser les alternances négatives mais cette fois-ci dans le cas du triphasé. Pour ce faire, l'étage de 3 diodes est doublé et le système comporte ainsi 3 branches de 2 diodes :



Comme pour les autres solutions, nous établissons un tableau théorique des valeurs notables du système telles que la tension redressée, la tension de ronflement ou encore les tensions minimale et maximale mesurables en sortie du circuit avec l'erreur en Volt qu'elles traduisent :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Source de tensions :			Redresseur : chute de tension				Condensateur : Tension de ronflement				Tensions après Pont diviseur de tension (V) :				Erreur PDdT (%)			Ecart entre tension calculée et tension parfaite (V) :		
Ue mono eff (V)	Ue mono ampl (V)	Ue tri eff (V)	drop volt (V)	Uredress (V)	Uredress théo (V)	Erreur (%)	I (A)	dU (V)	Umoy (V)	% err	min (x0,998)	normal (x1)	max (x1,002)	Théorique	min	norm	max	min	norm	max
7	10	12,2	16,2	16,2	17,3	6,78%	5E-06	0,018	16,21	-0,06%	0,054	0,054	0,054	0,058	-6,59%	-6,40%	-6,22%	-0,8	-0,8	-0,8
14	20	24,5	33,5	33,5	34,6	3,28%	1E-05	0,037	33,52	-0,06%	0,112	0,112	0,112	0,115	-3,42%	-3,23%	-3,04%	-0,8	-0,8	-0,7
21	30	36,7	50,9	50,9	52,0	2,16%	2E-05	0,057	50,83	-0,06%	0,169	0,169	0,170	0,173	-2,37%	-2,17%	-1,98%	-0,9	-0,8	-0,7
28	40	49,0	68,2	68,2	69,3	1,61%	2E-05	0,076	68,14	-0,06%	0,227	0,227	0,228	0,231	-1,84%	-1,64%	-1,45%	-0,9	-0,8	-0,7
35	50	61,2	85,5	85,5	86,6	1,29%	3E-05	0,095	85,45	-0,06%	0,284	0,285	0,285	0,289	-1,52%	-1,33%	-1,13%	-0,9	-0,8	-0,7
42	60	73,5	102,8	102,8	103,9	1,07%	3E-05	0,114	102,76	-0,06%	0,342	0,343	0,343	0,346	-1,31%	-1,11%	-0,92%	-1,0	-0,8	-0,7
50	70	85,7	120,1	120,1	121,2	0,92%	4E-05	0,133	120,07	-0,06%	0,399	0,400	0,401	0,404	-1,16%	-0,96%	-0,76%	-1,0	-0,8	-0,7
57	80	98,0	137,5	137,5	138,6	0,80%	5E-05	0,153	137,38	-0,06%	0,457	0,458	0,459	0,462	-1,05%	-0,85%	-0,65%	-1,0	-0,8	-0,6
64	90	110,2	154,8	154,8	155,9	0,71%	5E-05	0,172	154,69	-0,06%	0,515	0,516	0,517	0,520	-0,96%	-0,76%	-0,56%	-1,1	-0,8	-0,6
71	100	122,5	172,1	172,1	173,2	0,64%	6E-05	0,191	172,00	-0,06%	0,572	0,573	0,574	0,577	-0,89%	-0,69%	-0,49%	-1,1	-0,8	-0,6
78	110	134,7	189,4	189,4	190,5	0,58%	6E-05	0,210	189,31	-0,06%	0,630	0,631	0,632	0,635	-0,83%	-0,63%	-0,43%	-1,1	-0,9	-0,6
85	120	147,0	206,7	206,7	207,8	0,53%	7E-05	0,230	206,63	-0,06%	0,687	0,689	0,690	0,693	-0,78%	-0,58%	-0,39%	-1,2	-0,9	-0,6
92	130	159,2	224,1	224,1	225,2	0,49%	7E-05	0,249	223,94	-0,06%	0,745	0,746	0,748	0,751	-0,74%	-0,54%	-0,34%	-1,2	-0,9	-0,5
99	140	171,5	241,4	241,4	242,5	0,46%	8E-05	0,268	241,25	-0,06%	0,803	0,804	0,806	0,808	-0,71%	-0,51%	-0,31%	-1,2	-0,9	-0,5
106	150	183,7	258,7	258,7	259,8	0,43%	9E-05	0,287	258,56	-0,06%	0,860	0,862	0,864	0,866	-0,68%	-0,48%	-0,28%	-1,2	-0,9	-0,5
113	160	196,0	276,0	276,0	277,1	0,40%	9E-05	0,307	275,87	-0,06%	0,918	0,920	0,921	0,924	-0,65%	-0,45%	-0,25%	-1,3	-0,9	-0,5
120	170	208,2	293,3	293,3	294,4	0,37%	1E-04	0,326	293,18	-0,06%	0,975	0,977	0,979	0,981	-0,63%	-0,43%	-0,23%	-1,3	-0,9	-0,5
127	180	220,5	310,7	310,7	311,8	0,35%	1E-04	0,345	310,49	-0,06%	1,033	1,035	1,037	1,039	-0,61%	-0,41%	-0,21%	-1,3	-0,9	-0,5
134	190	232,7	328,0	328,0	329,1	0,34%	1E-04	0,364	327,80	-0,06%	1,090	1,093	1,095	1,097	-0,59%	-0,39%	-0,19%	-1,4	-0,9	-0,4
141	200	245,0	345,3	345,3	346,4	0,32%	1E-04	0,384	345,11	-0,06%	1,148	1,150	1,153	1,155	-0,57%	-0,37%	-0,17%	-1,4	-0,9	-0,4
149	210	257,2	362,6	362,6	363,7	0,30%	1E-04	0,403	362,42	-0,06%	1,206	1,208	1,210	1,212	-0,56%	-0,36%	-0,16%	-1,4	-0,9	-0,4
156	220	269,5	379,9	379,9	381,0	0,29%	1E-04	0,422	379,73	-0,06%	1,263	1,266	1,268	1,270	-0,54%	-0,34%	-0,14%	-1,5	-0,9	-0,4
163	230	281,7	397,3	397,3	398,4	0,28%	1E-04	0,441	397,04	-0,06%	1,321	1,323	1,326	1,328	-0,53%	-0,33%	-0,13%	-1,5	-0,9	-0,4
170	240	294,0	414,6	414,6	415,7	0,27%	1E-04	0,461	414,35	-0,06%	1,378	1,381	1,384	1,386	-0,52%	-0,32%	-0,12%	-1,5	-0,9	-0,4
177	250	306,2	431,9	431,9	433,0	0,25%	1E-04	0,480	431,66	-0,06%	1,436	1,439	1,442	1,443	-0,51%	-0,31%	-0,11%	-1,6	-0,9	-0,3
184	260	318,4	449,2	449,2	450,3	0,24%	1E-04	0,499	448,97	-0,06%	1,494	1,497	1,500	1,501	-0,50%	-0,30%	-0,10%	-1,6	-1,0	-0,3
191	270	330,7	466,5	466,5	467,6	0,24%	2E-04	0,518	466,28	-0,06%	1,551	1,554	1,557	1,559	-0,49%	-0,29%	-0,09%	-1,6	-1,0	-0,3
198	280	342,9	483,9	483,9	485,0	0,23%	2E-04	0,538	483,59	-0,06%	1,609	1,612	1,615	1,617	-0,48%	-0,28%	-0,08%	-1,7	-1,0	-0,3
205	290	355,2	501,2	501,2	502,3	0,22%	2E-04	0,557	500,90	-0,06%	1,666	1,670	1,673	1,674	-0,47%	-0,27%	-0,07%	-1,7	-1,0	-0,3
212	300	367,4	518,5	518,5	519,6	0,21%	2E-04	0,576	518,21	-0,06%	1,724	1,727	1,731	1,732	-0,47%	-0,27%	-0,07%	-1,7	-1,0	-0,2
219	310	379,7	535,8	535,8	536,9	0,21%	2E-04	0,595	535,52	-0,06%	1,782	1,785	1,789	1,790	-0,46%	-0,26%	-0,06%	-1,7	-1,0	-0,2
226	320	391,9	553,1	553,1	554,2	0,20%	2E-04	0,615	552,83	-0,06%	1,839	1,843	1,846	1,847	-0,45%	-0,25%	-0,05%	-1,8	-1,0	-0,2
230	325	398,1	561,8	561,8	562,9	0,20%	2E-04	0,624	561,49	-0,06%	1,868	1,872	1,875	1,876	-0,45%	-0,25%	-0,05%	-1,8	-1,0	-0,2

Contrairement aux trois premiers systèmes où la tension redressée devait atteindre 230*v(2) = 325 V continu, elle doit atteindre 230*v(2)*v(3) = 563 V continu environ en avec ce redresseur car la tension redressée est la tension entre deux phases la plus grande qui est donc plus importante que la tension entre phase et neutre.

Remarque : Cette tension étant supérieure au 500 V prévu lors du dimensionnement des résistances du pont diviseur de tension, la tension aux bornes de l'optocoupleur sera donc plus grande que 2V : le choix de cette solution nécessiterait donc d'adapter les résistances si cette solution parait plus utile. En effet, en conservant les résistances R1 = 2M490 Ohm et R2 = 10k Ohm, nous devrions avoir en entrée de l'ACPL-C87B-000E une tension de 2.252 V ce qui est trop important pour notre module.

D'après les simulations, la tension redressée après le pont de diodes oscille entre 561 et 562 V en utilisant un condensateur de 1 mF. Nous retrouvons donc bien les 563V théorique, la différence de tension étant due à la chute de tension des diodes.

Tension en sortie avec C1 = 1 mF, comprise entre 2.2 et 2.3 V
Pas de temps : 20 ms. Pas de tension : 10 mV.

D'après cette simulation, la tension aux bornes de l'optocoupleur serait d'environ 2.247 V en utilisant un condensateur C1 de 1 µF et des résistances R1 et R2 de 10 et 2490 kOhm respectivement. La marge d'erreur serait alors de 0,2% par rapport à ce qui était attendue. Cette marge d'erreur est plus faible que celle simulée avec un redresseur monophasé à double alternance qui était de 0,4%. Par rapport au redresseur à simple alternance, la précision est la même pour les deux systèmes avec une marge d'erreur de 0,2%.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Bien que nous ayons ajouté deux diodes supplémentaires, la tension maximale a été multipliée par 1.732 et la chute de tension aux bornes des 6 diodes est donc moins visible avec un redresseur triphasé double alternance qu'avec son homologue monophasé vu plus tôt.

Dans les conditions du second test où l'amplitude des tensions des générateurs étaient de 150 V, nous devons obtenir une tension redressée de 150*v(3) = 259.8 V : la tension attendue aux bornes de R2 serait alors, dans le cas idéal, de 1.039 V. La tension redressée simulée oscille entre 258.3 et 258.6 V et la tension après le pont diviseur est alors 1,0345 V : nous avons une marge d'erreur de 0,4% là où, en monophasé, nous avions une marge d'erreur de 1% avec le redresseur à double alternance et de 0,5% avec celui à simple alternance.

Pour notre troisième test, nous devons obtenir une tension en sortie de :

$$U_s = U_c \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_e . \sqrt{3} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 * \sqrt{3} * \frac{10}{2490 + 10} = 69\, mV$$

Nous obtenons, pour une capacité de 1 mF, une tension de 65,1 mV parfaitement continue. La marge d'erreur par rapport à la valeur théorique est alors de 6,4%, plus faible que les 8% et 14,3% de marge d'erreurs simulée plus tôt avec les redresseurs à simple alternance et à double alternance respectivement.

Nous simulons à nouveau notre circuit avec d'autres condensateurs comme nous l'avons fait plus tôt. Les tensions obtenues aux bornes de l'amplificateur d'isolement sont alors les suivantes :

Condensateur (F) \ Tension en entrée (V)	7	106	230
1n	Oscille entre 0,058 et 0,065	Oscille entre 0,92 et 1,03	Oscille entre 1,95 et 2,244
1µ	0,065	Oscille entre 1,033 et 1,0345	Oscille entre 2,243 et 2,246
1m	0,065	1,035	2,247

Tensions (V) aux bornes de l'amplificateur d'isolement relevées dans les simulations pour différentes tensions d'entrées et différentes capacités de filtrage

Condensateur (F) \ Tension en entrée (V)	7	106	230
1n	28	26,6	26,8
1µ	6,2	0,5	0,3
1m	6,2	0,4	0,2

Marge d'erreur (%) entre le modèle idéal et les valeurs relevées dans les simulations

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

En comparaison avec le tableau théorique calculé pour l'utilisation d'un condensateur 1 µF :

- Les tensions mesurées aux bornes de l'amplificateur d'isolement seraient de 65 / 1034 / 2244 mV environ d'après les simulations et de 65 / 1036 / 2246 mV d'après notre tableau. Notre modèle théorique est donc relativement proche des résultats obtenus lors de nos simulations.

- les marges d'erreurs sont de 6,2 / 0,5 / 0,3 % et 6,4 / 0,5 et 0,3 % pour les simulations et les calculs respectivement. Là encore, le modèle utilisé dans le tableau semble extrêmement proche du modèle utilisé dans LTSpice et les valeurs calculées pour les différentes valeurs de tensions en entrées doivent être exactes.

Nous pouvons donc noter qu'avec une marge d'erreur de 0,3% par rapport au cas idéal pour la tension la plus élevée, le système atteint donc le degré de précision espéré qui est +/- 1 V. Tout comme le redresseur triphasé simple alternance, cette solution est envisageable pour notre cas.

L'avantage de ce système sur la solution présentée au paragraphe précédent est l'utilisation d'un pont de diodes permettant de doubler la fréquence par rapport au redresseur triphasé simple alternance, et donc d'obtenir une fréquence 6 fois supérieure à celle du signal en entrée permettant donc d'avoir une tension de ronflement très faible : l'erreur due à la variation de tension est donc réduite et le signal en sortie parait plus constant.

L'utilisation d'un second étage de diodes double la chute de tension entre l'entrée et la sortie du bloc redresseur comme dans le cas du redresseur monophasé double alternance. Cependant, contrairement à ce dernier, cette chute de tension supplémentaire a moins d'impact sur la précision car la tension redressée est alors la tension entre deux phases et non la tension entre phase et neutre : un gain de $\sqrt{3}$ sépare les deux tensions et, en proportion, la chute de tension n'est pas beaucoup plus importante que pour le redresseur simple alternance.

De plus, contrairement au redresseur triphasé simple alternance, le neutre n'est pas utilisé dans ce système et le nombre de bornier nécessaire est donc de 3 au lieu de 4.

Les défauts de ce système sont l'utilisation du triphasé qui nécessite là encore des organes de sécurité tels qu'un sectionneur engendrant un coût supplémentaire comme pour le redresseur simple alternance. Cependant, la tension redressée est bien plus importante et nécessite donc des composants pouvant résister à une tension de 600 V continu. Le pont diviseur de tension n'ayant pas été prévu pour une telle tension, la résistance R1 doit être de 2,990 MOhm et non de 2,490 MOhm : il suffit d'ajouter 2 résistances de 249 kOhm en série des 10 utilisées sur le prototype pour pallier ce problème dans la chaine de mesure.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.2.6.3 AUTRES POSSIBILITES

Les quatre solutions proposées pour cette nouvelle version de la carte alternative reposent sur l'utilisation du module ACPL-C87B-000E qui avait été choisi par rapport à d'autres amplificateurs d'isolement lors de la conception du premier prototype.

Une solution alternative à ces amplificateurs d'isolement pour la carte alternative est le transformateur. L'utilisation d'un transformateur permet l'isolation galvanique en amont du redresseur et du pont diviseur de tension pour se passer d'un optocoupleur et du circuit de traitement en aval. Choisir cette solution permet de distinguer deux types de transformateurs intéressants dans notre cas : le transformateur d'isolement et le transformateur de sécurité.

III.2.6.3.1 TRANSFORMATEUR D'ISOLEMENT

Le transformateur d'isolement est, comme son nom l'indique, un transformateur permettant d'isoler galvaniquement un circuit d'un autre en conservant la tension alternative grâce à un gain unitaire. Ainsi, nous pourrions donc n'utiliser qu'un redresseur et un pont diviseur de tension entre le transformateur et le convertisseur analogique-numérique du microcontrôleur.

Chaine de mesure constituée du transformateur, du bloc redresseur et du pont diviseur de tension entre la source et le microcontrôleur

Puisque la tension d'entrée du bloc redresseur est identique à celle de la source étudiée, les études réalisées sur les différents redresseurs dans les paragraphes précédents s'appliquent aussi à cette solution. Dans le cas où nous utiliserions un transformateur monophasé, seuls les redresseurs monophasés étudiés au chapitre III.2.6.2.1 seraient utilisables. Pour utiliser les redresseurs de meilleures précisions que sont les redresseurs triphasés étudiés au chapitre III.2.6.2.2, il sera nécessaire d'utiliser un transformateur triphasé bien plus couteux.

L'avantage de cette solution est de déplacer le problème de l'isolation galvanique en amont de la mesure et donc de protéger l'intégralité de la carte électronique qui ne comporte plus que le bloc redresseur et les ponts diviseurs de tension : l'amplificateur d'isolement, l'amplificateur opérationnel et les différents composants autour de ces derniers ne sont plus utiles au bon fonctionnement de la mesure.

Cependant, si cette solution permet de gagner de la place sur la carte électronique, celle-ci prend un volume conséquent avec le transformateur à côté de la carte et peut s'avérer sensible. De plus, l'utilisation d'un transformateur amène une solution nettement plus onéreuse que celles utilisant un amplificateur d'isolement.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

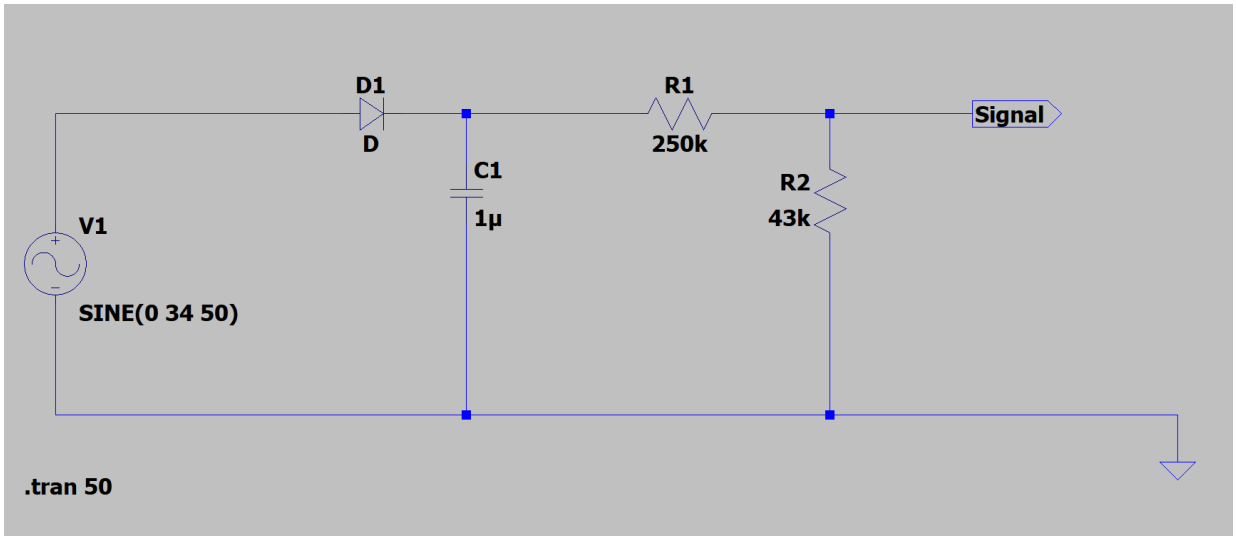
III.2.6.3.2 TRANSFORMATEUR DE SECURITE

Dans le paragraphe précédent, nous avons parlé du transformateur d'isolement qui permet d'isoler galvaniquement l'entrée et la sortie du transformateur tout en assurant un gain unitaire. Ici, nous nous penchons sur l'utilisation d'un transformateur de sécurité abaissant la tension en entrée à 24 V maximum. En théorie, cette solution devrait être moins précise que la précédente car la tension en entrée du bloc redresseur est bien moins importante et l'impact du pont de diodes se ressentira donc davantage sur la mesure. L'intérêt de cette méthode, cependant, est l'utilisation de tensions plus faibles apportant un gain de sécurité.

Tout comme pour le transformateur précédent, l'utilisation d'un transformateur monophasé induira l'utilisation d'un redresseur monophasé. Les redresseurs triphasés, plus précis, demanderont l'achat d'un transformateur triphasé plus onéreux.

Dans notre exemple, nous nous penchons donc sur l'étude du redresseur monophasé simple alternance qui avait fourni de meilleurs résultats que le redresseur monophasé double alternance lors de notre étude au chapitre III.2.6.2.1. Dans le cas où nous aurions 230 V efficace en entrée, la tension en sortie du transformateur serait de 24 Veff, soit une tension ayant pour amplitude maximale 34 V. Ainsi, la tension redressée aux bornes du condensateur C1 doit donc être une tension continue d'environ 34 V.

Nous reproduisons donc le circuit utilisant un redresseur simple alternance avec une tension en entrée de 34 V d'amplitude avec un pont diviseur de tension adapté :

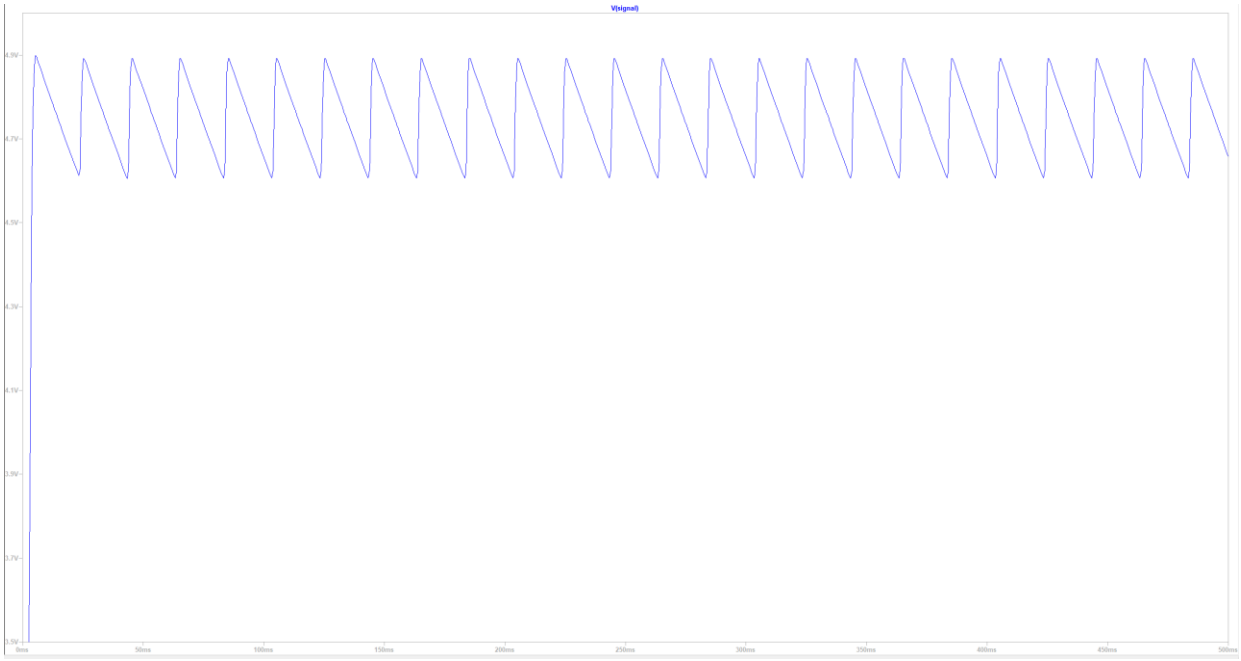


Circuit simulant le comportement d'un redresseur simple alternance avec une tension abaissée par un transformateur de sécurité

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

L'amplitude de la tension en entrée ayant été divisée par 10, nous adaptons notre pont diviseur de tension en divisant l'impédance par 10 environ afin de conserver l'échelle de courant utilisée jusqu'ici. Nous choisissons donc R2 telle que la résistance fasse 250 kOhm et adaptons R1 en fonction de celle-ci. D'après la même formule utilisée lors du dimensionnement des résistances dans la partie III.2.1 :

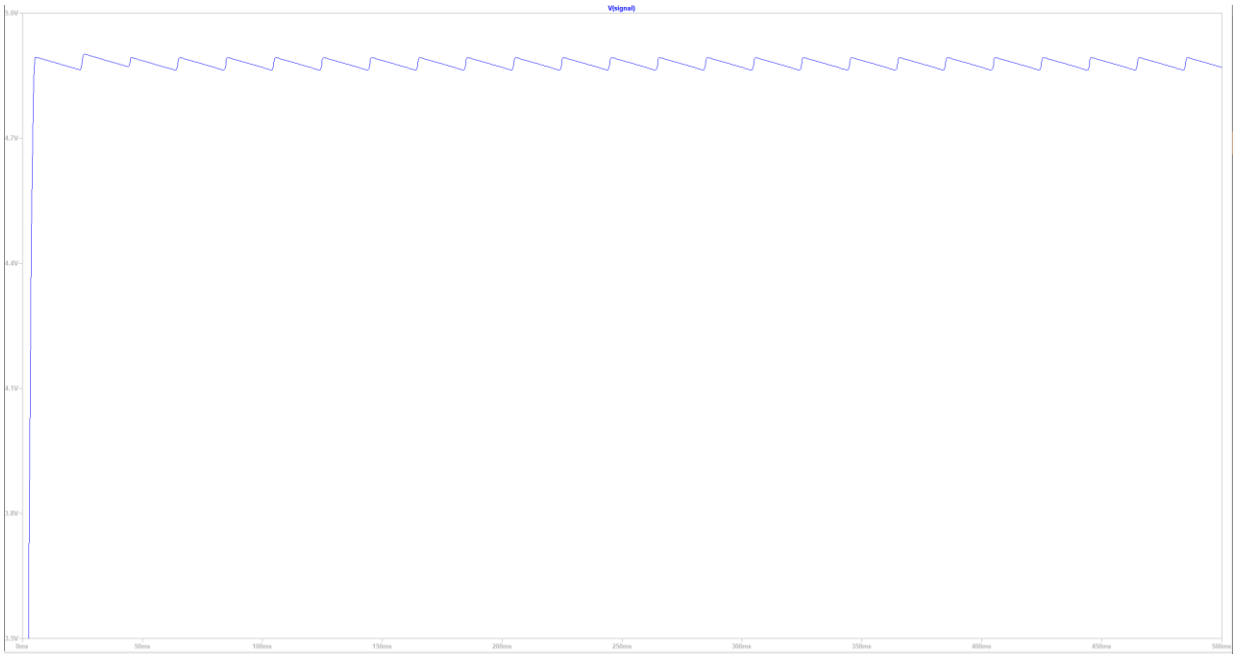
Qui nous donne donc R2 = 43 kOhm pour obtenir une tension de 5 VDC en sortie. En conservant la capacité de filtrage C1 = 1 µF, nous observons le signal ci-dessous en sortie :



Tension (V) en sortie entre 3,5 et 5 V avec le transformateur de sécurité et un condensateur de filtrage C1 = 1 µF sur une période de 500 ms.
Pas de temps : 50 ms. Pas de tension : 200 mV

Comme nous pouvons le voir, la tension de ronflement en sortie du circuit est importante : la capacité de filtrage n'est plus assez grande. En effet, la tension oscille entre 4,620 V et 4,906 V, soit une oscillation de l'ordre de 6%. Nous resimulons donc ce circuit avec une capacité de 10 µF afin de diminuer l'amplitude de cette tension de ronflement :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



Tension (V) en sortie entre 3,5 et 5 V avec le transformateur de sécurité et un condensateur de filtrage C1 = 10 µF sur une période de 500 ms.
Pas de temps : 50 ms. Pas de tension : 250 mV

La tension obtenue avec une plus grande capacité varie alors entre 4,865 V et 4,895 V, soit une oscillation de l'ordre de 0,6%, plus acceptable que la précédente. Avec une tension moyenne de 4,880 V, ce système a donc une marge d'erreur de 2,5 %, là où les systèmes avec une tension redressée à 325 ou 563 V ont des marges d'erreurs comprises entre 0,3 et 0,5 %.

Comme nous le supposions en début de paragraphe, la chute de tension due à la diode pose un problème de taille lorsque les tensions en amont du bloc redresseur sont plus faibles. A cause de cela, cette solution a des résultats 5 fois moins bon que les autres étudiées plus tôt.

Cette solution propose donc une alternative intéressante permettant de sécuriser davantage le problème grâce à une isolation galvanique complète de la carte et à l'utilisation de très basses tensions. Cependant, cet avantage est à nuancer avec la perte de précision très importante du système, sans oublier le coût et le volume occupé par un transformateur imposant, comme nous l'avons déjà cité dans le paragraphe précédent.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.2.6.4 SOLUTION RETENUE

III.2.6.4.1 EXPLICATIONS

Nous avons donc analysé différentes possibilités pour cette troisième version de la carte récupérant les tensions alternatives : certaines se sont basées sur l'amplificateur d'isolement utilisé lors de la création du premier prototype nécessitant une sortie de 2 V en sortie du circuit et d'autres ont utilisé un transformateur pour isoler galvaniquement le circuit sortant une tension pouvant atteindre 5 V sur le microcontrôleur directement.

A cause du volume important occupé par les transformateurs et leur coût élevé pour obtenir un système précis avec l'utilisation du triphasé, les solutions à base de transformateur n'ont pas été retenues bien qu'elles avaient l'avantage d'isoler efficacement le circuit à la source. Notre choix a donc été la conservation du module ACPL-C87B-000E étant donné que ce composant permettait de répondre au cahier des charges.

Grâce aux simulations des parties III.2.6.2, nous avons pu voir qu'une capacité de filtrage de 1 µF permettait d'obtenir un temps de réponse de 5 ms qui est bien suffisant par rapport a ce qu'imposait le cahier des charges. Ce choix de matériel nous permet donc d'avoir un temps de réponse bien inférieur à celui que nous avions plus tôt. Il permet tout de même de conserver une excellente précision avec une tension de ronflement suffisamment faible.

Pour ce qui est de la précision, le tableau suivant reprend les marges d'erreurs théoriques en amont de l'amplificateur d'isolement entre le modèle parfait utilisé dans l'algorithme et le modèle théorique présentés dans les tableaux des différentes solutions lors de l'utilisation d'un condensateur de 1 µF pour filtrer le signal en sortie du pont de diodes :

Solution \ Tension (%)	3,07	46,15	100
Monophasé simple alternance	6,81	0,77	0,53
Monophasé double alternance	14,3	1,01	0,5
Triphasé simple alternance	7,7	0,5	0,3
Triphasé double alternance	6,2	0,5	0,3

Marge d'erreur (%) calculée pour les différents redresseurs en fonction de différents niveaux de tensions que peut fournir le banc (%)

Pour obtenir une précision de +/- 1 V par rapport à la source de tension, des précisions de 14,3 % / 0,9 % / 0,4 % sont nécessaires pour les 3 niveaux de tensions fournies par la source étudiées ici qui sont 3 % / 46 % / 100 % respectivement.

Ces marges d'erreurs sont à nuancer avec la précision de l'amplificateur d'isolement et celle de l'amplificateur opérationnel derrière lui qui sont chacune de 0,1 %. Comme nous pouvons le voir la solution n°2 ne permet pas de remplir les exigences souhaitées (1% de précision a plus de 100 V) pour le système avant même de prendre en compte la précision des deux modules cités précédemment. Nous retirons donc la solution utilisant un redresseur monophasé à double alternance de nos possibilités :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Solution \ Tension (%)	3,07	46,15	100
Monophasé simple alternance	6,82	0,70	0,50
Triphasé simple alternance	7,72	0,50	0,30
Triphasé double alternance	6,21	0,50	0,30

Marge d'erreur (%) calculée pour les différents redresseurs en fonction de différents niveaux de tensions que peut fournir le banc (%) en tenant compte de la précision de l'amplificateur d'isolement et de l'amplificateur opérationnel

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Avec la prise en compte de la précision de l'ACPL-C87B-000E et de l'ISO124, les marges d'erreurs sont sensiblement les même grâce à la grande précision des deux modules. Nous pouvons cependant écarter la solution utilisant le redresseur monophasé à simple alternance qui obtient une moins bonne performance que les deux autres lors des tensions les plus importantes. En effet, la marge d'erreur doit être de moins de 0,4% pour avoir une erreur d'environ +/-1V, et elle est de 0,5% dans ce cas-ci.

Concernant la démarcation entre les deux dernières solutions, nous préférons le redresseur triphasé simple alternance qui permet de rester sur des tensions inférieures à 400 V contrairement au redresseur triphasé double alternance. Ce choix permet d'avoir des tensions moins importantes et donc de garantir davantage de sécurité, mais aussi de conserver le matériel acheté pour le premier prototype plutôt que d'acheter de nouveaux composants pouvant résister à ces tensions plus élevées, et donc des composants plus onéreux que les premiers. Il est cependant à noter que cette solution n'est envisageable que si le neutre est distribué : ce qui est notre cas ici.

Nous avons donc vu que la chute de tension due au bloc redresseur était négligeable avec la solution retenue : la précision du circuit avant l'amplificateur d'isolement varie entre -0,8 et -1,2 V en considérant que le pont diviseur de tension est parfait. En prenant en compte la tolérance des résistances qui est de 0,1%, la précision du bloc réelle peut varier entre 0,4 et 2V.

Cependant, ce cas a peu de chance d'arriver et nécessite que les valeurs R1 et R2 respectent la condition *(0,99% ; 1,01%)* ou *(0,99% ; 1,01%)* de leur valeur nominale respectivement. En supposant que ce soit le cas, l'utilisation des résistances variables présentes sur chacun des ponts diviseurs de tension permet de corriger un écart trop important par rapport au modèle.

De plus, il est intéressant de noter que la précision du système peut encore être adaptée d'un point de vue algorithmique grâce à l'utilisation d'un modèle plus proche de la réalité tel que celui utilisé dans le tableau de mesures théoriques. Un décalage de la valeur cible de 1V permettrait donc d'avoir une précision comprise entre -0,2 et +0,2 V avec le système utilisé.

III.2.6.4.2 LISTE DES COMPOSANTS

Cette carte se basant sur de nombreux composants commandés lors de la conception du premier prototype, le tableau de composants à commander reste sensiblement le même à deux composants près :

Description	Nombre	Référence	Prix (€) par unité
Amplificateur d'isolation	1	ACPL-C87B-000E d'Avago	6,35
Amplificateur opérationnel	1	OPA2374AIDCNR de TI	1,65
Démultiplexeur 2 vers 4	1	MC74ACT139DG de On Semiconductor	0,48
Relais reed	6	HE3621A0500 de Littlefuse	0,86
Prise RJ45	1	54601-908WPLF de Amphenol ICC	0,356
Diode Zener 2,2 V	1	UDZVTE-172.2B de ROHM	0,152
Diode Zener 36V	1	1N5938BRLG de On Semiconductor	0,328
~~Pont redresseur à diodes, 50 V~~	~~2~~	~~DF005S2 de On Semiconductor~~	~~0,39~~
Diodes, 1000 V	3	1N4007 de NTE Electronics	0,175
Résistance 1 k	2	MCWR08X1001FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 2,55 k	2	ERJP06F2551V de Panasonic	0,0949
Résistance 4,3 k	1	MCWR08X4301FTL de Multicomp Pro	0,007
Résistance 10 k	2	MCWR08X1002FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 33 k	6	MCWR08X3302FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 47 k	2	MCWR08X4702FTL de Multicomp Pro	0,0078
Résistance 249 k	10	CRCW0805249KFKEA de Vishay	0,0834
Potentiomètre variable 2,5 k	3	3362P-1-252LF de BOURNS	0,289
Condensateur 100 n, 25 V	6	CL21B104KACNNNC de Samsung Electro-Mechanics	0,0511
Condensateur 100 n, 50 V	1	C0805C104M5RACTU de KEMET	0,0489
~~Condensateur 1 m, 50 V~~	~~2~~	~~MCGPR50V108M16X26 de Multicomp Pro~~	~~0,705~~
Condensateur 1 nF, 400 V	1	MKP4G041006B00KSSD de Wima	1,73
Bornier	2	PM5.08/2/90 de WEIDMULLER	0,505
~~**TOTAL**~~			~~**19,5629**~~
TOTAL			**19,9579**

Tableau des composants pour la nouvelle version du bloc 'récupération des valeurs' : Tension alternative

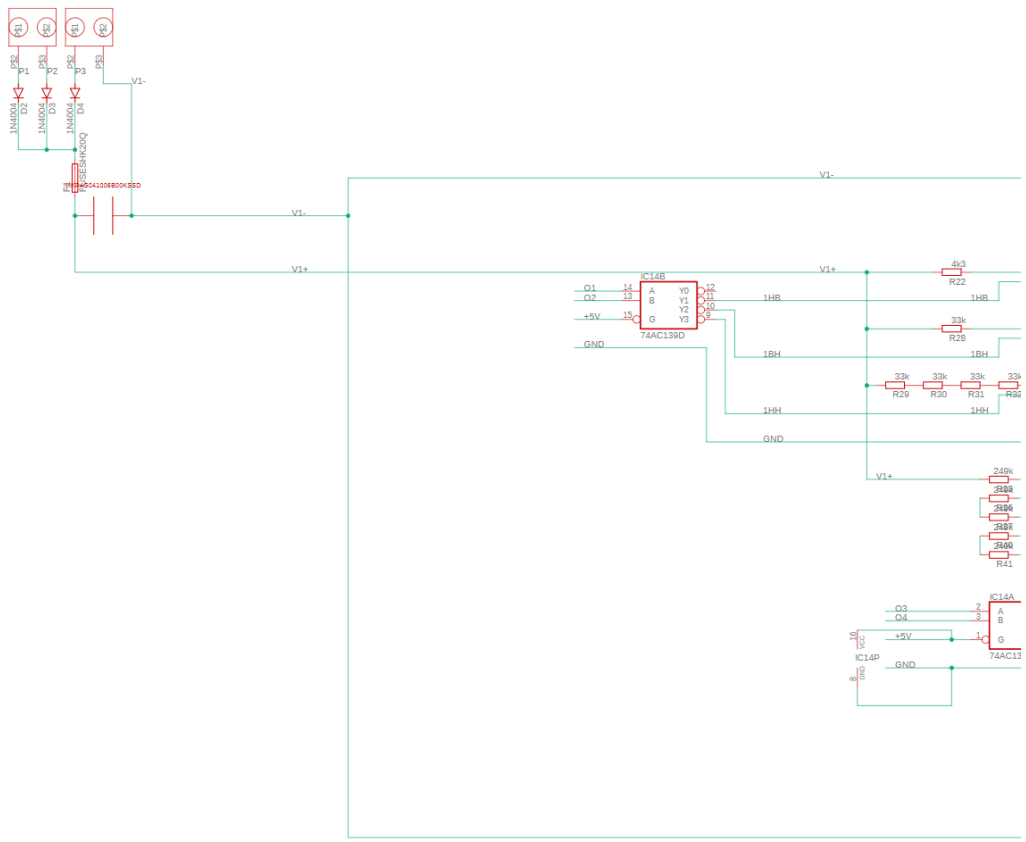
Contrairement au premier prototype, le nombre de borniers est passé à 2. De plus, les deux redresseurs et leurs capacités de filtrage de 1 mF placés après les ponts diviseurs de tension sont remplacés par trois diodes 1N4007 et par un condensateur 1 nF tolérant 400 V à ses bornes. Ce système permet ainsi de redresser la tension en entrée du circuit avant de la traiter.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

A noter : Le magasin de composants électroniques de Polytech Lille dispose de diodes 1N4007 dans ses stocks et permet donc de diminuer le coût de conception de la carte d'un peu plus de 50 centimes, faisant de cette solution une solution moins onéreuse que celle utilisée dans notre prototype.

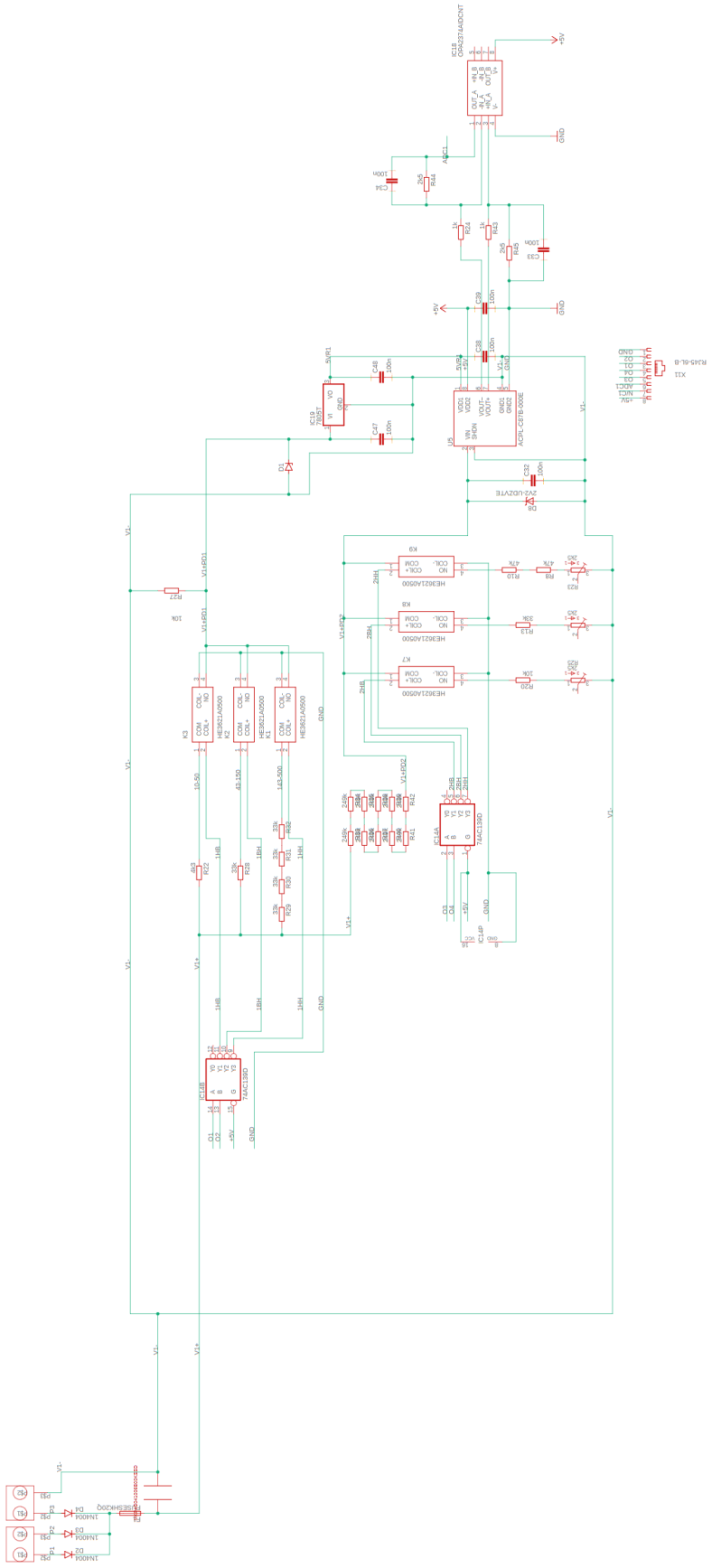
III.2.6.4.3 SCHEMATIC ET PCB

Après avoir fait la liste du matériel à acheter, nous sommes passés à la modification du schematic et du typon de la carte électronique. Comme mentionné plus haut, les deux redresseurs situés après les ponts diviseurs de tension sont remplacés par un unique redresseur placé juste après les borniers. Il s'agit de la seule différence notable de cette version :

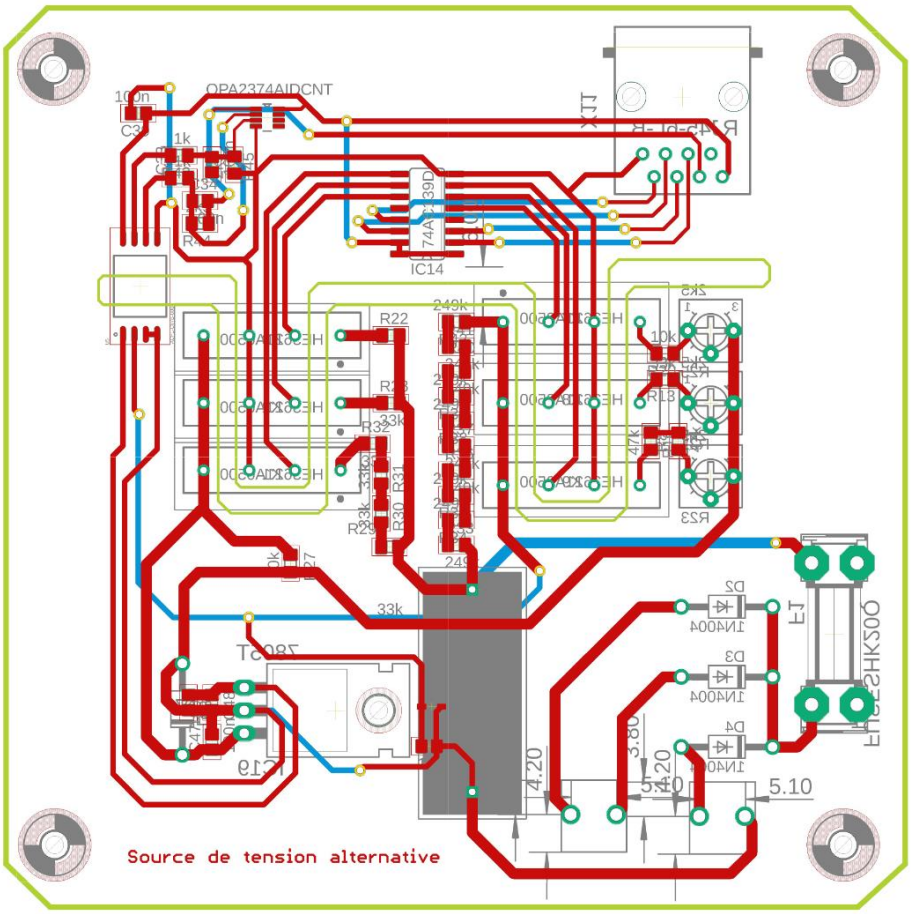


Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



La suppression des deux ponts redresseurs et de leurs capacité 1 mF a permis de faire suffisamment de place sur le typon pour intégrer les 3 diodes avec suffisamment d'espace entre les pistes. La surface de la carte a été diminuée au passage pour obtenir des dimensions inférieures à 10x10 cm² :



Typon de la nouvelle version de la carte électronique pour la récupération des tensions alternatives

En nous appuyant sur les simulations que nous avons mises en lumière dans les paragraphes précédents, nous pouvons donc affirmer que cette solution respectera les consignes du cahier des charges en fournissant en moins de 5 ms l'image des tensions en entrée avec une précision de +/- 1V voire moins.

Mais avant de récupérer ces cartes, une fois qu'elles avaient été conçues et envoyées à l'impression, il restait alors la partie logicielle à concevoir afin de mener à bien ce projet en écrivant le programme permettant au microcontrôleur de récupérer les données et de les envoyer comme attendu, mais aussi la préparation du serveur pour héberger ces données.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.3 INSTALLATION DU SERVEUR ET PROGRAMMATION DE L'APPLICATION

Afin de préparer l'arrivée des données en provenance de la carte, il a d'abord fallu installer le serveur. Une machine nous a ainsi été attribuée pour mener à bien nos essais et montrer les résultats de notre projet.

Contrairement au serveur de la salle tournant sous Lubuntu, la machine à notre disposition a été configurée pour tourner sous Ubuntu 18.04 LTS. L'adresse MAC de cette machine a été fournie au service informatique de Polytech afin de pouvoir l'utiliser sur le réseau de l'école, étape nécessaire pour l'installation des différents paquets dont nous avions besoin pour la configuration de notre serveur LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP). Le choix de cette solution a été fait sur la robustesse de ce système très utilisé de par le monde, et de sa simplicité à être mis en place sur un réseau local.

Une fois la connexion au réseau autorisée, nous avons pu installer sur la machine le serveur Apache2, MySQL 8.1 et PHP 7.2 ainsi que les différents paquets nécessaires à leur utilisation.

Il a alors fallu créer notre base de données pour héberger nos valeurs. Cette base a été appelée *E001* et ne contient qu'une seule table nommée *Tensions*, créée avec la configuration suivante :

Nom	Type	Description
ID	BIGINT UNSIGNED	*NOT NULL AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY*
Banc	INT	*DEFAULT 0*
DC1	INT	*DEFAULT 0*
AC	INT	*DEFAULT 0*
DC2	INT	*DEFAULT 0*
Date	DATETIME	*DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP ON UPDATE CURRENT_TIMESTAMP*

Tableau répertoriant les champs composants la table Tensions de la base E001

Le format *BIGINT UNSIGNED* utilisé pour le champ **ID** permet d'entrer 2^64-1 valeurs, soit de remonter plus de 10^19 informations en provenance des bancs de TP. Avec un rythme de 4 envois par seconde par module, nous atteignons donc plus de 10^14 heures de remontées d'informations avant de saturer la base de données.

Pour le champ **Date**, le type *Datetime* utilisé permet de stocker des dates et heures au format suivant 'YYYY-MM-DD hh:mm:ss' et a la particularité de pouvoir stocker des données du 1er janvier 1000 au 31 décembre 9999, échelle bien plus que suffisante pour notre application. Concernant la valeur par défaut, cette précision permet de mettre la date et l'heure actuelle lors de la sauvegarde de la donnée dans la table : le banc de TP n'envoyant les données qu'au moment où les mesures sont faites, nous ne risquons donc pas de fausser les valeurs en enregistrant à la date actuelle des données plus vieilles.

Afin d'utiliser la base de données, nous avons créé un nouvel utilisateur nommé '*4dm1n*' qui dispose de tous les privilèges et est accessible avec le mot de passe '*p4ssw0rd*'.

```
CREATE USER '4dm1n'@'localhost' IDENTIFIED BY 'p4ssw0rd';
GRANT ALL PRIVILEGES ON * . * TO '4dm1n'@'localhost';
FLUSH PRIVILEGES;
```

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Cet utilisateur nous permet ensuite de nous connecter à la base de données dans nos scripts PHP en faisant appel à une fonction PHP contenant les lignes suivantes :

```php
<?php

    function Connection()
    {
        $server="localhost";
        $user="4dm1n";
        $pass="p4ssw0rd";
        $db="E001";

        $connection = mysqli_connect($server, $user, $pass, $db);

        if (mysqli_connect_errno())
        {
            echo "Failed to connect to MySQL : " . mysqli_connect_error() ;
            exit() ;
        }

        //old mysql : mysql_select_db($db) or die( 'MySQL ERROR: '. mysql_error() );
        return $connection;
    }


?>
```

Fonction PHP à inclure dans chaque page pour accéder à la base de données

La fonction écrite ci-dessus permet de se connecter à la base de données *E001* avec l'identifiant *4dm1n* afin de faire d'envoyer des requêtes à cette dernière. Par exemple, la page d'accueil de l'application récupère d'abord l'accès à la base de données grâce à cette fonction dans la variable *$link* avant d'effectuer une requête SQL pour remplir le tableau, créé dynamiquement, avec les données des 7 bancs de la salle.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

```php
1  <?php
2
3      include("connect.php");
4      $link=Connection();
5  ?>
6
7  <html>
8      <head>
9        <title>Valeurs mesurées</Title>
10       <meta charset="UTF-8">
11       <script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/3.4.1/jquery.min.js"></script>
12       <link rel="stylesheet" media="screen" href="https://fontlibrary.org/face/segment7" type="text/css"/>
13     </head>
14
15
16     <body>
17        <h1>Valeurs mesurées</h1>
18
19        <table id="voltmetres" border="1" cellspacing="1" cellpadding="1">
20            <tr>
21                <th> Banc </th>
22                <th> Source 1 </th>
23                <th> Source 2 </th>
24                <th> Source 3 </th>
25                <th> Date </th>
26            </tr>
27
28            <?php
29                for ($i = 1; $i <= 7; $i++)
30                {
31                    $request = "SELECT DC1, AC, DC2, `Date` FROM `Tensions` WHERE Banc=".$i." ORDER BY date DESC LIMIT 1 ;" ;
32                    $result=mysqli_query($link, $request);
33
34
35                    if($result!==FALSE)
36                    {
37                        while($row = mysqli_fetch_array($result))
38                        {
39                            printf("<tr><td>  %s </td>
40                                <td><span class=\"seg\">  %s </span></td>
41                                <td><span class=\"seg\">  %s </span></td>
42                                <td><span class=\"seg\">  %s </span></td>
43                                <td>  %s  </td>
44                                <td><form action=\"tab.php\" method=\"post\"><input type=\"hidden\" name=\"banc\" value=\"%s\">
45                                        <input id=\"courbe\" type=\"submit\" value=\"\"></form></tr>",
46                                $i, $row["DC1"], $row["AC"], $row["DC2"], $row["Date"], $i);
47                        }
48                        mysqli_free_result($result);
49                    }
50
51                }
52            ?>
53
54
55        </table>
56
57        <p>
58            <form action="reset.php" method="post">
59                <button type="submit" class="reset" onclick="reset_tab();">Réinitialiser l'affichage
60                    <span class="tooltiptext">Insère des 0 dans la base pour effacer les données trop vieilles à l'écran</span>
61                </button>
62            </form>
63        </p>
64
65        <script>
66            setInterval('load_data()', 250) ;
67            function load_data()
68            {
69                $('#voltmetres').load('load_voltmetres.php') ;
70            }
71        </script>
72
73     </body>
74 </html>
```

Code de la page d'accueil de l'application

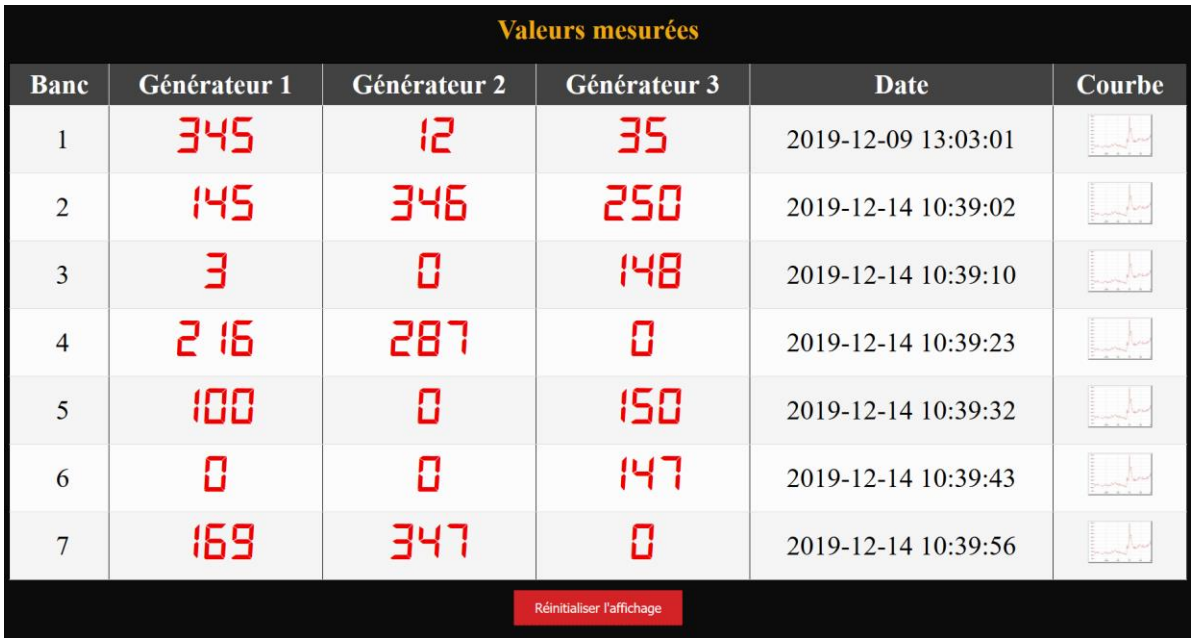
Les lignes 57 à 63 concernent le bouton "*Réinitialiser l'affichage*" qui appelle le fichier "*reset.php*" après avoir cliqué dessus. Ce fichier contient un script PHP qui effectue une requête SQL à la base de données pour injecter des tensions nulles sur les 7 bancs : le but de cette manœuvre est de remettre l'affichage à 0 pour effacer de l'écran les valeurs rémanentes d'un précédent TP. Après avoir envoyé ces requêtes, le script rouvre la page d'accueil de l'application de manière à ce que cela soit transparent pour l'utilisateur.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Bouton permettant de réinitialiser l'affichage de la page d'accueil de l'application

Afin de réactualiser le tableau de données affiché sur la page en permanence et sans rafraichir la page entière, nous ajoutant une fonction Javascript visible des lignes 65 à 71. Cette fonction permet de charger le contenu du script PHP "*load_voltmetres.php*" dans le div '*voltmetres'* de manière périodique. Ici, nous choisissons de réactualiser le tableau toutes les 250 ms et donc de proposer à l'encadrant un aperçu assez proche de la réalité des valeurs visibles sur les bancs de TP.

Ainsi, la page d'accueil de l'application ressemble à celle-ci :



Valeurs mesurées

Banc	Générateur 1	Générateur 2	Générateur 3	Date	Courbe
1	345	12	35	2019-12-09 13:03:01	
2	145	346	250	2019-12-14 10:39:02	
3	3	0	148	2019-12-14 10:39:10	
4	216	287	0	2019-12-14 10:39:23	
5	100	0	150	2019-12-14 10:39:32	
6	0	0	147	2019-12-14 10:39:43	
7	169	347	0	2019-12-14 10:39:56	

Réinitialiser l'affichage

Page d'accueil de l'application affichant les tensions de chaque banc de TP

Afin de proposer un suivi des valeurs, nous avons ajouté la possibilité de visualiser l'historique des données. Il suffit pour cela de cliquer sur l'image présente dans la dernière colonne de la ligne dont on souhaite en apprendre davantage. Une nouvelle page s'ouvre alors et affiche un graphique montrant l'évolution des tensions aux bornes des trois sources dans la journée.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Exemple de graphique obtenu après avoir cliqué sur l'image d'une des lignes de la page d'accueil

Ce graphique est réalisé grâce à *Highcharts*, une API open-source programmée en Javascript permettant la création de graphiques dynamiques et fonctionnels qui est gratuite pour un usage non-commercial comme ce projet. La requête SQL sur laquelle se base cette courbe récupère toutes les valeurs des trois sources de tension enregistrées aujourd'hui et provenant du banc choisi sur la page d'accueil. Le graphique affiche alors l'évolution chronologique des valeurs.

Pour obtenir plus de précision sur la valeur d'un point, l'utilisateur peut passer le curseur sur ce dernier : une infobulle apparait alors au survol et précise la valeur mesurée. Il est possible d'isoler une courbe en masquant les autres en cliquant sur ces dernières dans la légende à droite du graphique. Pour les faire réapparaitre, il suffit alors de cliquer à nouveau sur celles-ci.

Il est aussi possible de zoomer sur le graphique en sélectionnant une plage de données : pour cela, il suffit de cliquer sur le graphique au point de départ de la sélection et de maintenir ce clic jusqu'à la valeur finale à observer. Cela permet de sélectionner une plage de temps et donc de restreindre l'échelle des abscisses. Pour revenir à la vue d'ensemble de la journée, il suffit de cliquer sur le bouton '*Reset zoom*' qui apparait après avoir zoomé sur le graphique.

En haut à droite du graphique se trouve un bouton hamburger qui permet, après avoir cliqué dessus, de voir le graphique en plein écran, de l'imprimer, de le télécharger en divers formats (PNG, JPEG, PDF ou SVG) ou encore d'en extraire les données dans un fichier CSV ou XLS.

Un bouton tout en bas permet de revenir à la page d'accueil de l'application et avoir une vue sur les valeurs des 7 bancs.

L'application comporte les différents fichiers suivants :

- *index.php* : page d'accueil de l'application, c'est elle qui permet de visualiser le tableau de valeurs des 7 bancs en temps réel. C'est depuis cette page que nous pouvons afficher les courbes en cliquant sur le graphique à la fin de la ligne.

- *load_voltmetres.php* : script PHP qui s'insère dans le tableau de la page *index.php* afin de le mettre à jour plusieurs fois par seconde.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

- *reset.php* : script PHP qui est déclenché après un clic sur le bouton "*Réinitialiser l'affichage*" de *index.php*. Il permet de mettre des 0 pour toutes les valeurs des 7 bancs et efface donc les valeurs actuelles du tableau.

- *courbe.php* : page affichant l'évolution des données d'un des bancs de TP pour le jour en cours. S'ouvre après avoir cliqué sur l'image à la fin d'une des lignes de la page *index.php*.

- *add.php* : page sur laquelle sont envoyées les informations en provenance des bancs de TP afin d'être stockées dans la base de données du serveur. Cette page n'est pas destinée à être ouverte par l'utilisateur et n'affiche rien à l'écran. Si l'utilisateur ouvre cette page tout de même, il est redirigé vers la page *index.php*.

- *records.php* : page affichant toutes les données stockées dans la table par ordre chronologique décroissant. Ne sert qu'à des fins de tests.

- *form_post.html* : Page affichant un formulaire à remplir pour enregistrer des données manuellement dans la base de données. Ne sert qu'à des fins de tests.

- *action.php* : Script PHP permettant d'ajouter à la base de données les informations envoyées lors de la soumission du formulaire présent à la page *form_post.html*.

- *style.css* : Fichier CSS regroupant les caractéristiques esthétiques d'*index.php* et de *form_post.html.*

Une fois ces différents fichiers créés, nous avons pu tester l'application sur le serveur en envoyant des informations manuellement grâce à *form_post.html* et en visualisant ces données sur *index.php* et *courbe.php*. L'application fonctionnant avec des valeurs simulées, il resta donc à faire remonter les informations en provenance des bancs de TP de manière automatique en réalisant l'algorithme de la carte électronique présente sur le banc.

III.4 PROGRAMMATION DE LA CARTE "*PRINCIPALE*"

Afin d'écrire l'algorithme de la carte, nous avons décidé d'utiliser l'Arduino IDE et le langage de programmation des Arduino puisqu'une optimisation des ressources très poussée n'était pas nécessaire dans notre cas, et qu'il nous fallait gagner du temps sur le développement. Tout comme pour la conception de la carte électronique *"principale*", nous avons découpé le travail à réaliser en trois grandes parties qui sont :

- La récupération des données et leur traitement
- La manipulation des afficheurs 7 segments
- L'envoi des données au serveur

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

Afin de mettre au point l'algorithme des cartes présentes sur les bancs de TP, nous avons utilisé du matériel prêt à l'emploi pour gagner du temps en attendant les cartes électroniques. Ainsi, un Arduino Uno et son shield Ethernet nous ont permis de simuler le traitement des données et leur envoi sur le serveur de la salle. Une fois le driver de LEDs récupéré, nous avons pu le tester avec quelques LEDs sur une breadboard, puis les afficheurs 7 segments utilisés pour les cartes "*afficheurs*" afin de se rapprocher au plus près de l'aspect final du projet.

Pour ce qui est de la partie récupération des tensions, le prototype utilisé n'a pu se rapprocher de l'objectif final étant donné que la majorité des composants sont des CMS et nécessite donc la carte électronique créée plus tôt. Nous avons donc utilisé un potentiomètre afin de faire varier une tension de 0 à 5 VDC. Si le principe est le même que ce qui sera fait en fin de projet, cette approximation retarde la mise en place des coefficients finaux qui seront donc à régler lors de l'acquisition de la carte, sans quoi un décalage entre l'affichage et les valeurs réelles persistera.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.4.1 RECUPERATION DES DONNEES

La récupération des tensions est, pour l'Atmega, une simple lecture d'une tension analogique à l'une de ses bornes. Cette lecture est possible par l'utilisation de la fonction analogRead() qui renvoie un entier compris entre 0 et 1023 proportionnellement à la valeur de la tension lue, à condition que celle-ci n'excède pas 5 VDC.

```
#define VDC1_pin A2                                   // U1 -> tension continue à gauche du banc, lié à ADC2
int VDC1_value = 1025 ;
int VDC1_PdT = 0 ;                                    // Pont diviseur de tension 1 -> plus grande échelle possible

const int VDC_R1 = 2490 ;                             // valeur de R2, en kohm
const int VDC_R2[] = {10, 33, 94} ;                   // valeurs possibles de R1, en kohm
const int VDC_PdT_tens_hautes[] = {252, 161, 55} ;    // tensions (V) correspondant réciproquement aux valeurs à 1024 des différents ponts
const int VDC_PdT_lim_hautes[] = {1014, 955, 928} ;   // correspond réciproquement à des limites de 250V (1014 = 1.98/2), 150V (955 = 1.87/2) et 50V (928 = 1.82/2)
const int VDC_PdT_lim_basses[] = {569, 254, 185} ;    // correspond réciproquement à des limites de 140V (569 = 1.111/2), 40V (254 = 0.497/2) et 10V (185 = 0.362/2)

#define VDC1_mux_A 6                                  // Voie A du démux 2 vers 4 lié à la gestion des ponts diviseurs de tension de DC1
#define VDC1_mux_B 7                                  // Voie B ...
```

Données théoriques des seuils pour chaque canal de mesures

Nous créons donc des tableaux avec les limites théoriques sur 10 bits correspondant aux tensions de seuils des différentes échelles imposées par le choix des résistances qui vont nous permettre de donner la valeur de la tension après avoir lu une valeur grâce à la fonction map(), dont le principe est de donner une valeur multiplié par un facteur dépendant de l'échelle à laquelle nous souhaitons placer cette valeur. Par exemple, pour une valeur de 8 comprise entre 0 et 10, nous pouvons replacer ce 8 sur une échelle de 0 à 100, correspondant à un facteur 10 de la première échelle : la valeur sera alors 80.

En définissant nos bornes, nous pouvons donc traduire une valeur comprise entre 0 et 1024 pour déterminer la tension correspondant à celle-ci.

```
void setup()
{
  /* Activer les ponts diviseurs de tension permettant la lecture des plus hautes tensions par securité
       -> Pont diviseur de tension pour l'alimentation du 78L05 en cas alternatif : A et B à 5V
       -> Pont diviseur de tension pour obtenir 2V en entrée de l'ACPL-C87B : A à 5V et B à 0V
  */
  Serial.begin(9600) ;
  digitalWrite(PdT_mux_A, HIGH) ; digitalWrite(PdT_mux_B, HIGH) ;

  VDC1_PdT = 0 ; digitalWrite(VDC1_mux_A, HIGH) ; digitalWrite(VDC1_mux_B, LOW) ;
  VAC_PdT = 0 ; digitalWrite(VAC_mux_A, HIGH) ; digitalWrite(VAC_mux_B, LOW) ;
  VDC2_PdT = 0 ; digitalWrite(VDC2_mux_A, HIGH) ; digitalWrite(VDC2_mux_B, LOW) ;
}
```

Initialisation des canaux de mesures

Afin de déterminer l'échelle de mesures à utiliser, nous plaçons donc notre système dans une configuration par défaut lors de son initialisation. Cette configuration est celle comportant l'échelle la plus grande et qui permet donc de lire l'intégralité des valeurs sans poser de problème au système : il s'agit de l'échelle 0-250 V pour les sources continues et de l'échelle 0-400 V pour les sources alternatives. Ces échelles sont obtenues en envoyant 5 VDC sur la voie A du démultiplexeur et en connectant la voie B à la masse.

Pour l'alimentation du régulateur de tension 5 VDC en entrée de l'ACPL-C87B, la logique est différente et il est nécessaire d'envoyer 5 VDC sur les deux entrées du démultiplexeur 2 vers 4 afin de sélectionner le canal correspondant à une entrée pouvant atteindre les 400 VAC.

```
void loop()
{
  // Récupération des valeurs :
  VDC1_value = analogRead(VDC1_pin) ;
  /*Serial.print("La valeur mesurée est : ") ;
  Serial.println(VDC1_value) ;
  Serial.print("Le changement d'échelle se fait entre ") ;
  Serial.print(VDC_PdT_lim_basses[VDC1_PdT]) ;
  Serial.print(" et ");
  Serial.println(VDC_PdT_lim_hautes[VDC1_PdT]);*/

  // Test des échelles :
  if ((VDC1_value < VDC_PdT_lim_basses[VDC1_PdT]) and (VDC1_PdT < 2))
  {
      VDC1_PdT = VDC1_PdT + 1 ;   // on passe au pont diviseur du dessus, permettant de réduire l'échelle et d'augmenter la précision
      set_PdT_DC1(VDC1_PdT) ;
      Serial.print("Echelle réduite ! Echelle niveau : ") ;
      Serial.println(VDC1_PdT) ;
  }
  else if ((VDC1_value > VDC_PdT_lim_hautes[VDC1_PdT]) and (VDC1_PdT > 0))
  {
      VDC1_PdT = VDC1_PdT - 1 ;   // on passe au pont diviseur du dessous, permettant de lire des valeurs plus hautes
      set_PdT_DC1(VDC1_PdT) ;
      Serial.print("Echelle augmentée ! Echelle niveau : ") ;
      Serial.println(VDC1_PdT) ;
  }

  // Traduction valeur :
  else
  {
    Serial.print("L'échelle n'a pas changé. Echelle niveau : ") ;
    Serial.println(VDC1_PdT);

    //float temp = VDC1_value/1024 ; ///VDC_R1*VDC_R2[VDC1_PdT] ;

    // On récupère la tension correspondant à la valeur sur 1024. La tension la plus haute correspond à la valeur limite la plus haute pour un canal donné
    int val_VDC1 = map(VDC1_value, 0, VDC_PdT_lim_hautes[VDC1_PdT], 0, VDC_PdT_tens_hautes[VDC1_PdT]) ;
    Serial.print("Valeur affichée : ") ;
    Serial.println(tension) ;

    // Envoi de la valeur sur l'afficheur 7 segment et sur le réseau
  }
  delay(2000) ;
}
```

Code principal lié à la lecture de la tension

Comme nous pouvons le voir sur ce code, il est donc nécessaire de vérifier sur quel canal nous nous trouvons à chaque mesure et s'il est nécessaire de changer de canal de mesures avant de traduire celle-ci en une tension à envoyer au réseau et à afficher sur le banc de TP. Afin de choisir facilement le pont diviseur de tensions à utiliser, nous écrivons une courte fonction pour chacune des trois sources telle que nous pouvons le voir ci-dessous pour la source de tension continue DC1 :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

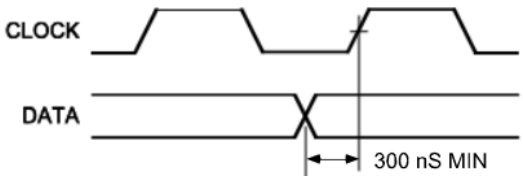
```
void set_PdT_DC1(int val_pont)
{
  if (val_pont == 0)                        // Calibre 0-252 V
  {
    digitalWrite(VDC1_mux_A, HIGH) ;
    digitalWrite(VDC1_mux_B, LOW) ;
  }
  else if (val_pont == 1)                   // Calibre 0-161 V
  {
    digitalWrite(VDC1_mux_A, LOW) ;
    digitalWrite(VDC1_mux_B, HIGH) ;
  }
  else if (val_pont == 2)                   // Calibre 0-55 V
  {
    digitalWrite(VDC1_mux_A, HIGH) ;
    digitalWrite(VDC1_mux_B, HIGH) ;
  }
}

```

Fonction permettant de mettre à jour le pont diviseur de tension pour une des trois sources

Le principe de cette fonction est de vérifier le choix du pont diviseur de tension lorsque celui-ci est changé afin de mettre à 5 VDC ou à GND les deux signaux en entrée des démultiplexeurs en sachant que, matériellement, (5, 0) correspond au canal de base qui est donc le plus grand, et que les couples (0, 5) et (5, 5) correspondent réciproquement au second et dernier canaux. Le couple (0, 0), lui, est utilisé comme sécurité afin de ne pas utiliser de pont diviseur de tension et donc de ne pas envoyer de valeurs non maitrisées à l'amplificateur d'isolation.

III.4.2 AFFICHAGE DES DONNEES SUR LES CARTES "*AFFICHEURS*"

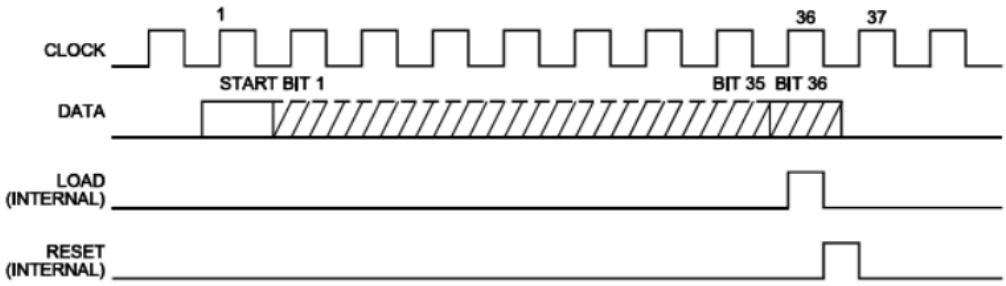
Pour afficher les valeurs des tensions mesurées sur les cartes "afficheurs", il suffit d'envoyer une trame adaptée au module MM5451. En effet, les deux entrées de cette puce sont un signal d'horloge '*clock*' et un signal de données '*data*' sur lequel est lue une trame de 36 bits : à chaque front montant de l'horloge, un buffer de 35 bits récupère l'état actuel du signal de données pour construire la trame avant de la traiter. Afin de garantir l'exactitude du message récupéré par le MM5451, 300 nanosecondes doivent séparer chaque front montant du signal *clock* d'un changement de valeur sur le signal *data*.



Condition temporelle à garantir lors de l'envoi de la trame

De plus, chaque trame doit être amorcée par un état haut lu sur le signal *data* afin de signaler au module l'arrivée d'une nouvelle trame : deux trames de données peuvent donc être séparées par une infinité de front montant de *clock*, à conditions que *data* soit à l'état bas. Ainsi, l'état des 35 sorties est représenté par l'état de *data* à partir du second front montant de *clock*.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite



Représentation d'une trame envoyée au module, caractérisée par 36 fronts montants de clock et d'un état haut de data en début de message

Dans notre cas, le signal clock n'est pas relié à une horloge mais est géré par le microcontrôleur qui permet de faire varier la fréquence d'envoi en fonction de notre utilisation. L'activation d'un segment, par exemple, peut donc se faire en plaçant la sortie du microcontrôleur liée à *data* à l'état haut au bon moment, puis en faisant suivre un état bas et un état haut sur la sortie liée à *clock*.

Afin d'allumer une LED sur deux avec ce module, il suffirait par exemple de placer la sortie liée à *data* sur l'état haut, d'enclencher un front montant de *clock*, puis de manipuler *data* en fonction de la parité du bit actuel en le faisant suivre d'un front montant de *clock*, comme nous le faisons dans cet extrait de code sous Arduino IDE :

```
1   digitalWrite(dataBit, HIGH) ;
2   pulseCLK() ;
3   for (int i = 0; i < 35; i++)
4   {
5     if (i%2 == 0)
6     {
7       digitalWrite(dataBit, HIGH) ;
8       pulseCLK() ;
9       //Serial.print(i) ;
10      //Serial.println(" : allumée !");
11    }
12    else
13    {
14      digitalWrite(dataBit, LOW) ;
15      pulseCLK() ;
16      //Serial.print(i) ;
17      //Serial.println(" : éteinte !");
18
19    }
20  }
```

Extrait de code permettant d'allumer une LED sur deux

Pour le pilotage des afficheurs 7 segments, nous créons tout d'abord une correspondance entre le chiffre à afficher et les différents segments à allumer en binaire :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

```
// Tableau des codes binaires pour les afficheurs 7 segments
byte segCode[] =
{
  // GFEDCBA
  0b00111111,       // 0
  0b00000110,       // 1
  0b01011011,       // 2
  0b01001111,       // 3
  0b01100110,       // 4
  0b01101101,       // 5
  0b01111101,       // 6
  0b00000111,       // 7
  0b01111111,       // 8
  0b01100111        // 9
};
```

Tableau comprenant les codes binaires pour afficher les chiffres de 0 à 9 sur les afficheurs 7 segments

Une fois ce tableau de codes binaires écrits, il suffit de récupérer le chiffre à afficher, et d'utiliser le code binaire correspondant à ce chiffre. Dans notre cas, puisque les afficheurs sont connectés au MM5451 de manière à ce que la première sortie soit le segment A, la seconde le segment B, et ainsi de suite jusqu'à la septième sortie reliée au segment G, nous réalisons une comparaison sur la valeur du dernier bit avant de faire un décalage de bits par la droite : si la valeur de ce dernier bit est 1, alors *data* est mis à l'état haut et un front montant de *clock* est envoyé; sinon *data* est à l'état bas avant le front montant de *clock*. Cette fonction est appelée *ssrWriteLSB* :

```
void ssrWriteLSB(byte value)
{
  for(int x =0; x < 8; x++)
  {
    byte temp = value & 0x01;
    if (temp == 0x01)   digitalWrite(dataBit, 1); // data : état haut
    else digitalWrite(dataBit, 0);                // data : état bas
    pulseCLK();                                   // clock : front montant
    value = value >> 0x01;                        // Décalage par la droite
  }
}
```

Fonction ssrWriteLSB() permettant le décalage vers la droite du mot binaire et de l'envoi du bit de poids le plus faible vers le buffer du MM5451

Grâce à cette fonction, nous pouvons alors facilement injecter dans la trame les 7 bits indiquant les segments à allumer. Dans l'exemple ci-dessous, deux afficheurs 7-segments sont allumés par deux trames différentes : la première permet d'allumer les segments de l'afficheur de gauche, représentant les dizaines, tandis que la seconde allume ceux du dernier afficheur représentant les unités. L'intérêt de procéder de cette manière a été de simuler le pilotage des afficheurs à l'aide des transistors.

En effet, le multiplexage utilisé pour diminuer le nombre de fils nécessaires entre la carte "*principale*" et les cartes "*afficheurs*" demande en contrepartie de manipuler les afficheurs un par un. Cette technique demande donc d'utiliser 4 à 8 trames pour afficher l'information sur les afficheurs, diminuant donc la luminosité apparente.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

```
int sensor_value = analogRead(sensor) ;                    // Récupération de la valeur à afficher (0-1024)

int u = sensor_value % 10 ;                                // Unité de la valeur (exemple : pour 451, 1)
int d = (sensor_value % 100 - u)/10 ;                      // Dizaine de la valeur (exemple : pour 451, 5)
int c = (sensor_value % 1000 - d - u)/100 ;                // Centaine de la valeur (exemple : pour 451, 4)
//int m = (sensor_value % 10000 - c - d - u)/1000 ;
//int dm = (sensor_value % 100000 - m - c - d - u)/10000 ;
//Serial.print(sensor_value) ; Serial.print(" : ") ; Serial.print(d) ; Serial.print(" | ") ; Serial.println(u) ;


/* Première trame pilotant le premier afficheur, celui des dizaines */
// start bit
digitalWrite(dataBit, 1);
pulseCLK();

ssrWriteLSB(segCode[d]);        // envoi des 8 bits indiquant à l'afficheur 7 segment la dizaine à afficher
zeroWrite(27);                  // On complète la trame avec des états bas (35-8=27)

//delay(1000);



/* Seconde trame pilotant le deuxième afficheur, celui des unités */
// start bit
digitalWrite(dataBit, 1);
pulseCLK();

zeroWrite(7);                   // on envoie 7 états bas afin de ne pas perturber l'afficheur des dizaines
ssrWriteLSB(segCode[u]);        // envoi des 8 bits indiquant à l'afficheur 7 segment l'unité à afficher
zeroWrite(20);                  // On complète la trame avec des états bas (35-7-8=20)

//delay(50);
```

Exemple de code permettant de récupérer la valeur d'un capteur et d'envoyer la dizaine et l'unité sur deux afficheurs 7 segments à l'aide de deux trames différentes

D'après ce test, la fréquence d'affichage des chiffres sur les afficheurs 7 segments est suffisante pour que l'œil humain puisse voir les chiffres alignés en même temps, sans décalage. De plus, la luminosité, bien que nettement plus faible avec le multiplexage, reste suffisante pour voir la valeur de loin avec une lumière ambiante importante. La manipulation des afficheurs 7 segments est donc satisfaisante et valide donc les critères attendus.

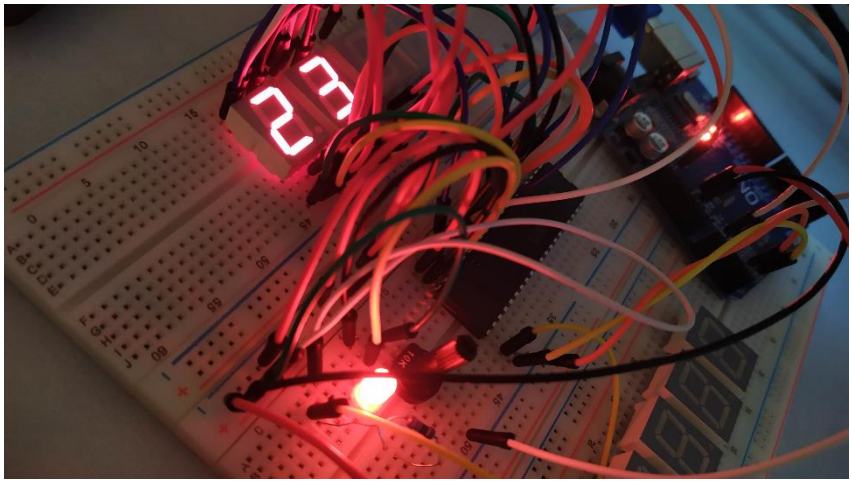


Photo de la manipulation de deux digits à l'aide de 8 trames simulant le cas final

Bien que les afficheurs permettront aux étudiants de visualiser les tensions aux bornes de leurs générateurs depuis leur banc de TP, il nous reste à aborder la remontée des données vers le serveur de la salle E001.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

III.4.3 ENVOI DES DONNEES SUR LE SERVEUR

Pour l'envoi des données sur le serveur, nous nous servons de la bibliothèque *ethernet* qui est open-source et qui dépend d'une autre appelée *spi*. Ces librairies sont par défaut inclues dans l'Arduino IDE et il suffit donc de les inclure en début de fichier pour les utiliser lors du développement. Ils permettent ensuite de faciliter la connexion au réseau pour la puce W5100 que nous avions choisi plus haut.

```
1   #include <Ethernet.h>
2   #include <SPI.h>
```

Utilisation des bibliothèques Ethernet et SPI dans notre programme

Il convient ensuite de paramétrer le client en lui affectant une adresse MAC et une adresse IP et d'indiquer l'adresse IP du serveur avec lequel nous allons communiquer avant d'initialiser la connexion :

```
1   byte mac[] = { 0x00, 0xAA, 0xBB, 0xCC, 0xDE, 0x01 }; // RESERVED MAC ADDRESS
2   EthernetClient client;
3
4   IPAddress ip(192,168,1,3);
5   IPAddress server(192,168,1,1);
6   IPAddress myDns(192,168,1,1);
7   IPAddress gateway(192,168,1,1);
8
9
10  void setup()
11  {
12    Serial.begin(9600);
13    Ethernet.begin(mac, ip, myDns, gateway) ;
14    Serial.println(ip) ;
15    if (Ethernet.begin(mac, ip) == 0)
16    {
17      Serial.println("Failed to configure Ethernet using DHCP");
18    }
19  }
20
```

Paramétrage et initialisation de la connexion avec le réseau

Une fois la connexion avec le réseau établie, nous sommes parvenus à envoyer les informations au serveur avec le script suivant :

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

```
1   /* Données à envoyer */
2   banc = 7 ; dc1 = 123 ; ac = 312 ; dc2 = 230 ;
3
4   // Création de la chaine de caractère à envoyer par requête POST
5   data = "Banc=" + String(banc) + "&DC1=" + String(dc1) + "&AC=" + String(ac) + "&DC2=" + String(dc2) ;
6
7
8   if (client.connect(server,80)) // REPLACE WITH YOUR SERVER ADDRESS
9   {
10    //Serial.println("Client connecté");
11    client.println("POST /pfe/add.php/ HTTP/1.1");
12    client.println("Host: 192.168.1.1"); // SERVER ADDRESS HERE TOO
13    //Serial.println("Host: 169.254.116.49");
14    client.println("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded");
15    client.print("Content-Length: ");
16    client.println(data.length());
17    client.println();
18    client.print(data);
19  }
20
21  if (client.connected()) {
22    client.stop();  // DISCONNECT FROM THE SERVER
23  }
24
25
```

Mise en forme de la requête à envoyer (ligne 5) et envoi de celle-ci sur le serveur à l'adresse 192.168.1.1 pour compléter les informations du formulaire add.php

Les données à envoyer au serveur, présentes sur l'extrait de code à la ligne 2, sont mises en forme de la manière suivante :

"*Nom du champ du formulaire*"="*Valeur liée à ce champ*"

Dans le cas où nous envoyons des données pour compléter plusieurs champs du formulaire de destination, ces informations doivent être séparées par le symbole '*&*' sans aucun espace. Un exemple se trouve à la ligne 5 du code précédent où nous souhaitons compléter les champs *Banc*, *DC1*, *AC* et *DC2* du formulaire de destination se trouvant à *192.168.1.1/pfe/add.php*. Ces champs sont donc complétés par les valeurs des variables de même nom, ayant été préalablement converties en chaine de caractères.

Arrive ensuite le test de connexion avec le serveur qui, s'il réussit, aboutit à l'envoi de la requête POST en précisant, dans l'ordre, où trouver le formulaire à remplir, à quelle adresse envoyer la requête, le format de la requête POST, sa longueur et enfin la requête créée plus tôt.

Le format permet de signaler que la requête POST est faite sous la forme d'une chaine de caractères respectant la construction que nous avons détaillé ci-dessus, ce format n'étant pas celui utilisé par les formulaires HTML après avoir cliqué sur un bouton soumettant le contenu de ce formulaire.

Afin de tester notre algorithme, nous avons utilisé le Shield Ethernet d'Arduino sur une carte Arduino Uno. Une fois connectée au serveur par l'intermédiaire d'un câble RJ45, et après avoir correctement paramétré les IP, nous obtenons sur l'application les données fixées dans le script : l'envoi des données vers le serveur fonctionne donc correctement.

D'après ces différents tests, nous avons donc bien développé une application web permettant le suivi des tensions en temps réel et ne demandant aucune maintenance comme demandé dans le cahier des charges.

De plus, un historique précis des tensions sur les bancs au cours de la journée a été ajouté pour faciliter le suivi des tensions lors du déroulement d'un TP.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

IV RESULTATS

A l'issu de ce projet, nous n'avons donc pu récupérer les tensions sur les bancs de TP. Nous avons toutefois réussi à sortir les cartes *afficheurs* et à les faire fonctionner. Le code écrit pour le prototype reposant sur une carte Arduino permet de récupérer trois valeurs analogiques, et d'afficher les tensions correspondant à ces valeurs sur les afficheurs 7 segments présents sur les diverses cartes localisées sur le banc de TP.

Enfin, ces tensions sont aussi envoyées à un serveur local qui affiche sur un écran les valeurs remontées par les différents bancs de TP dans un tableau qui s'actualise plusieurs fois chaque seconde afin de proposer à l'encadrant du TP des informations en temps réel. Il a aussi été ajouté la possibilité d'ouvrir une page montrant l'évolution des tensions au cours de la journée pour chaque banc de TP.

Bien que certains points répondent aux attentes du client, ce projet n'a pu aboutir suite à un manque de connaissances sur l'isolation galvanique et une mauvaise étude de la solution proposée qui ont pénalisé sévèrement la sortie d'une carte électronique fonctionnelle. Ce problème aurait toutefois pu être limité si les efforts avaient été concentrées sur la sortie de la carte la plus problématique plutôt que sur celles qui furent nettement plus simples.

Le projet n'a donc pas été réussi comme espéré. Toutefois les autres aspects du projet ont tous été abordés et réussis. Le projet aurait donc pu être un franc succès s'il avait concerné deux étudiants : un se serait occupé de concevoir des cartes aux normes pour récupérer les tensions aux bornes des générateur, avant de gérer leur intégration aux bancs de TP et d'écrire le protocole de sécurité, tandis que l'autre étudiant se serait occupé du reste, qui a été réussi dans ce projet. De cette manière, un prototype aurait clairement pu être envisagé et intégré sur un des bancs de TP.

Pour compenser les défauts du premier prototype, à savoir une carte récupérant les tensions alternatives avec un temps de réponse bien trop long et une précision trop faible, une nouvelle version V3 de cette carte a été conçue dans un second temps. Cette carte, s'appuyant sur des simulations, permettra d'obtenir un meilleur comportement transitoire et permanent que sa première version qui avait été dessinée trop précipitamment.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

V AMELIORATIONS POSSIBLES DU PROJET

Une amélioration possible de ce projet serait l'utilisation d'une puce W5500 plutôt que la W5100 utilisée ici. En effet, cette puce est une version améliorée de la dernière et a l'avantage d'avoir un coût réduit de moitié. Elle n'a pas été utilisée ici suite à un manque de connaissances sur les différentes possibilités proposées par le marché.

D'un point de vue algorithmique, la conversion de la tension mesurée aux bornes du microcontrôleur en l'image de la tension d'entrée est très simple et repose sur une mise à l'échelle de la valeur récupérée par rapport aux valeurs théoriques d'un modèle parfait, négligeant les erreurs résiduelles telles que la chute de tension due aux diodes et la tension de ronflement résultant au redressement de la tension. L'utilisation d'un modèle plus complexe, se basant sur le fait que la tension de 2V en entrée de l'amplificateur d'isolement n'est jamais atteinte, pourrait donc améliorer encore la précision du système pour qu'elle soit de +/- 0,5 V seulement, même à 400 VAC efficace.

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

VI REFERENCES

MYSQL :

- Datetime :
  https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/datetime.html
- Auto init datetime :
  https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/timestamp-initialization.html
- Datetime en millisecondes :
  https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/fractional-seconds.html
- Créer un utilisateur :
  https://www.digitalocean.com/community/tutorials/how-to-create-a-new-user-and-grant-permissions-in-mysql
- Limiter le nombre de valeur dans une requête SQL :
  https://stackoverflow.com/questions/20878089/php-and-mysql-select-a-single-value

HTML/CSS :

- W3School :
  https://www.w3schools.com/
- Police type 7 segments :
  https://fontlibrary.org/en/font/segment7

PHP :

- Formulaires et requêtes POST :
  https://www.php.net/manual/fr/tutorial.forms.php
- SQL Connect :
  https://www.php.net/manual/fr/function.mysqli-connect.php
- SQL Error :
  https://www.php.net/manual/fr/function.mysql-error.php
- Création dynamique d'un tableau
  https://openclassrooms.com/forum/sujet/boucle-php-pour-creer-un-tableau-html-13827
- Actualiser tableau grâce à JQuery :
  https://www.youtube.com/watch?v=HsvpKa-erpI

Highcharts :

- Site officiel :
  https://www.highcharts.com/

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

- Highcharts et PHP :
  https://openclassrooms.com/forum/sujet/highcharts-avec-php

Arduino :

- Librairie Ethernet :
  https://www.arduino.cc/en/Reference/Ethernet
- Arduino Ethernet Rev 3 :
  https://store.arduino.cc/arduino-ethernet-rev3-without-poe
- Envoi des données sur MySQL :
  https://www.instructables.com/id/PART-1-Send-Arduino-data-to-the-Web-PHP-MySQL-D3js/
- Envoi des données par requête POST :
  https://eskimon.fr/tuto-arduino-802-arduino-et-ethernet-client
  https://blog.protoneer.co.nz/arduino-http-post-requests/
- Récupération des données analogiques :
  https://eskimon.fr/tuto-arduino-401-les-entr%C3%A9es-analogiques-de-larduino

Amplificateur d'isolation :

- ACPL-C87B :
  https://www.mouser.com/datasheet/2/678/V02-3563EN_DS_ACPL-C87x_2016-09-05-909299.pdf

Driver de LEDs :

- Datasheet du MM5451 :
  http://www.farnell.com/datasheets/57504.pdf?_ga=2.83106198.1277133319.1574261698-2107771478.1573500755
- Exemple de programme :
  https://arduino.stackovernet.com/fr/q/4367
- Tutoriel :
  http://www.bristolwatch.com/ele2/arduino_MM5451.htm

Puce Ethernet :

- W5100 :
  https://www.mouser.fr/datasheet/2/443/W5100_Datasheet_v1.2.5-586411.pdf

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite

W5500 :

- Comparaison W5100 et W5500 :
  https://forum.wiznet.io/t/topic/1396
- Shield Arduino à base de W5500 :
  https://store.arduino.cc/arduino-ethernet-shield-2

Electronique :

- Choix de la capacité de lissage :
  http://nononux.free.fr/index.php?page=elec-brico-outils#!elec-brico-outil-lissage-tension

Ce document est la propriété de POLYTECH LILLE et ne peut être reproduit sans son autorisation écrite