

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

CONCEPTION D'UN CONTRÔLEUR DE COURANT POUR UNE
SOURCE DC ALIMENTANT DES TORCHES À PLASMA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
AMIRA CHÉRITI

AVRIL 2020

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. Sc. A.)

Direction de recherche :

Mamadou Lamine Doumbia

directeur de recherche

Jury d'évaluation

Mamadou Lamine Doumbia

Évaluateur

Marco Tremblay

Évaluateur externe

Alben Cardenas Gonzalez

Évaluateur

Résumé

Les progrès importants de l'électronique de puissance depuis le début du 21^e siècle ont permis à de nombreuses applications à courant élevé de voir le jour. Le domaine des énergies renouvelables est un bon exemple d'applications pour les sources de courant continu. Les thyristors, les diodes et les transistors ont donné naissance à plusieurs topologies de convertisseur de puissance. Ces dispositifs d'électroniques nécessitent des contrôleurs adaptés afin d'optimiser leur utilisation sur de puissantes charges électriques non linéaires telles des torches à plasma et leur comportement dépend de la configuration dans laquelle ils sont utilisés.

Les torches à plasma, présentant un cycle d'opération aux nombreuses variantes, requièrent une topologie bien adaptée et un contrôleur de courant de sortie très stable capable de résister aux variations agressives imposées par le procédé. Elles ont pour objectifs de générer un arc électrique entre une cathode et une anode. Un système stable et adéquatement contrôlé permettra de garantir sa fiabilité aux utilisateurs.

La topologie nommée convertisseur entrelacé est étudiée et testée dans un réacteur à plasma composé de trois torches à plasma. Un contrôleur de courant parallèle est aussi implémenté et ajusté aux conditions agressives d'un tel milieu.

Le nombre de composants nécessaires est optimisé afin de minimiser le coût du produit final et faciliter son entrée sur le marché déjà nombreux en compétiteurs. Puisqu'il s'agit

d'un système industriel, des protections assurant la sécurité des utilisateurs, des opérateurs et des équipements sont mises en place.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon employeur Suez WTS qui a supporté ce projet en m'accordant tous les équipements et le soutien tant financier que matériel nécessaire à la réalisation de ce travail. Je suis reconnaissante de travailler dans une organisation où la recherche scientifique est vivement encouragée. Je voudrais remercier plus précisément mes collègues qui ont contribué à ce projet ou à développer les différentes plates-formes qui ont permis la réalisation de ce travail. Je tiens à exprimer mon entière reconnaissance à M. Marco Tremblay pour son dévouement, ses idées innovantes et sa passion pour l'ingénierie qu'il me transmet chaque jour. Sa rigueur scientifique et sa sagesse me servent de modèle!

Je voudrais également remercier mon directeur, M. Mamadou Lamine Doumbia pour ses conseils et son temps tout au long de la réalisation de ce projet.

Je tiens à remercier mon père, le professeur Ahmed Chériti, pour ses précieux conseils et sa faculté à avoir une réponse à toutes mes questions. D'une disponibilité exceptionnelle, sa discipline et sa rigueur scientifique m'ont permis l'atteinte de mes objectifs et la réussite de mes études.

Finalement, je tiens à remercier ma famille et mon mari qui ont été d'un soutien hors pair au cours de cette aventure.

Table des matières

Résumé.....	iii
Remerciements.....	v
Table des matières.....	vi
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures.....	xi
Liste des symboles.....	xv
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.2.1 Convertisseur DC-DC.....	3
1.2.2 Contrôleur de courant.....	7
1.3 Objectif.....	8
1.4 Méthodologie.....	9
1.5 Organisation du mémoire.....	10
Chapitre 2 - Généralités sur les torches à plasma.....	11
2.1 Mode de fonctionnement.....	11

2.2 Exemples d'application	16
2.3 Stades d'opération	18
2.3.1 Allumage des torches.....	19
2.3.2 Comportement du circuit équivalent.....	20
2.4 Stabilité.....	23
2.4.1 Fluctuation de l'arc électrique	24
2.4.2 Érosion des cathodes.....	25
2.5 Conclusion.....	26
Chapitre 3 - Topologie du convertisseur DC-DC	27
3.1 Qualité de l'onde	27
3.2 Performances d'une unité d'alimentation.....	28
3.3 Ondulation (« ripple ») sur le courant de sortie.....	29
3.4 Convertisseur buck-entrelacé	31
3.5 Séquences de commutation	36
3.6 Conclusion.....	39
Chapitre 4 - Commande du convertisseur et protection.....	40
4.1 Stratégie de commande.....	40
4.1.1 Contrôleur PID.....	40
4.1.2 Contrôleur à hystérésis (ou Bang-Bang).....	42

4.1.3	Contrôleur parallèle	43
4.2	Programmation de la méthode de contrôle	46
4.2.1	Programmation.....	46
4.2.2	Rampe générée au démarrage	49
4.3	Méthode de protection.....	50
4.1	Conclusion.....	51
Chapitre 5 - Simulation théorique		52
5.1	Modélisation du comportement d'une torche.....	52
5.2	Simulation du convertisseur entrelacé.....	56
5.2.1	Commande non décalée	58
5.2.2	Commande décalée	59
5.3	Simulation du contrôleur de courant	60
5.3.1	Contrôleur Bang-Bang ou à hystérésis	64
5.3.2	Filtrage de la lecture du courant.....	69
5.3.3	Rampe d'accélération.....	71
5.4	Protection des équipements électriques.....	73
5.4.1	Condition nécessitant l'arrêt du système	74
5.4.2	Conditions ne nécessitant pas l'arrêt immédiat	78
5.5	Conclusion.....	79

Chapitre 6 - Validation expérimentale	80
6.1 Essai en laboratoire (Département R&D Suez WTS)	80
6.2 Intégration et programmation des blocs de logique	83
6.3 Page web intégrée.....	86
6.4 Essai-usine (torche à plasma)	89
6.5 Protection.....	97
6.6 Conclusion.....	100
Chapitre 7 - Conclusion	102
Références	104

Liste des tableaux

Tableau 3-1	Comparaison de l'ondulation entre un convertisseur monophasé et deux phases.....	36
Tableau 3-2	Table de vérité du mode de contrôle des IGBT.....	38
Tableau 5-1	Valeur des composants utilisés pour les simulations du convertisseur.....	58

Liste des figures

Figure 1-1	Schéma conventionnel d'une source DC avec compensateur STATCOM [18]	5
Figure 2-1	Les quatre états de la matière [35]	12
Figure 2-2	Schéma d'une torche à plasma [2]	12
Figure 2-3	Mode d'injection du gaz plasmagène [2]	13
Figure 2-4	Représentation d'un jet de plasma [2]	14
Figure 2-5	Température d'opération des torches à plasma selon le gaz plasmagène [2]	15
Figure 2-6	Puissances requises pour le fonctionnement d'une torche [7]	16
Figure 2-7	Poudre sphérique de titane de différents diamètres [39]	17
Figure 2-8	Exemple d'implant médical pour la hanche réalisé par fabrication additive [24]	18
Figure 2-9	Variation de l'impédance pendant l'amorçage de l'arc [23]	20
Figure 2-10	Circuit équivalent avant le démarrage [11]	21
Figure 2-11	Circuit équivalent après le démarrage de la torche [11]	21
Figure 2-12	Mode discontinu d'opération à l'allumage de la torche [6]	22
Figure 2-13	Différence de tension entre une torche neuve et usée [2]	26
Figure 3-1	Convertisseur Buck classique [32]	32
Figure 3-2	Convertisseur entrelacé pour l'alimentation de la torche à plasma [3]	33
Figure 3-3	Convertisseur entrelacé à deux cellules de commutation [32]	33
Figure 3-4	Comportement du convertisseur entrelacé à deux phases [3]	34
Figure 3-6	Schéma bloc de la génération des signaux	37

Figure 3-7	Mode de fonctionnement des signaux [33]	38
Figure 4-1	Diagramme bloc d'un contrôleur PID [37]	41
Figure 4-2	Contrôleur Bang-bang ou à Hystérésis.....	43
Figure 4-3	Diagramme de décision du choix de contrôleur	44
Figure 4-4	Intégration des deux contrôleurs	45
Figure 4-5	Capteurs de courant installés sur chacune des branches [33].....	46
Figure 4-6	Bloc PID de la librairie Simulink	47
Figure 4-7	Bloc de logique nécessaire pour reproduire le bloc PID de la librairie Simulink.....	47
Figure 4-8	Conception d'un PID simplifié.....	48
Figure 4-9	PID réalisé à l'aide de bloc simplifié.....	48
Figure 4-10	Génération de la rampe de la consigne de courant	50
Figure 5-1	Schéma de modélisation d'une torche à plasma et de son contrôleur.....	53
Figure 5-2	Modélisation de la torche à plasma	54
Figure 5-3	Résultat de la simulation de la torche à plasma.....	55
Figure 5-4	Modélisation des inductances de sortie selon leur définition.....	55
Figure 5-5	Simulation du convertisseur entrelacé.....	57
Figure 5-6	Courant L1 et L2 identiques d'une commande non décalée	59
Figure 5-7	Courant dans les branches L1 et L2 et somme des courants en boucle ouverte ($D = 0.5$).....	60
Figure 5-8	Ajout d'un contrôleur PID avec une consigne de 200 A	61
Figure 5-9	Simulation des courants de sortie après l'ajout d'un PID.....	62
Figure 5-10	Simulation suite à l'ajout de deux contrôleurs.....	63
Figure 5-11	Modèle du contrôleur à hystérésis.....	65
Figure 5-12	Mesure du courant et de la tension avec l'ajout d'un contrôleur.....	66
Figure 5-13	Simulation des contrôleurs parallèles.....	67

Figure 5-14	Simulation du convertisseur DC-DC avec modification de la charge	68
Figure 5-15	Comportement des contrôleurs au démarrage et à la suite d'une perturbation.....	69
Figure 5-16	Filtre passe-bas de la lecture de courant.....	70
Figure 5-17	Comparaison de la lecture du courant de sortie avec et sans filtrage.....	71
Figure 5-18	Simulation de la rampe de la consigne	72
Figure 5-19	Comportement de la rampe de la consigne du convertisseur	72
Figure 5-20	Courants de sortie suite à l'ajout d'une rampe progressive de la consigne.....	73
Figure 5-21	Montage du convertisseur incluant les protections de surintensité	74
Figure 5-22	Définition de la limite de courant	75
Figure 5-23	Contrôleur de courant PID et génération du signal MLI.....	75
Figure 5-24	Arrêt du convertisseur suite à un changement brusque de charge.....	76
Figure 5-25	Surintensité provoquée par un changement brusque de la charge (ajout d'un délai sur la lecture de 300 us)	77
Figure 5-26	Simulation d'une variation de la consigne.....	78
Figure 6-1	Banc de test R&D	81
Figure 6-2	Charge d'inductance du convertisseur entrelacé	82
Figure 6-3	Intégration des contrôleurs parallèles.....	84
Figure 6-4	PID Branche L1 et L2.....	85
Figure 6-5	Contrôleur Bang-Bang.....	85
Figure 6-6	Serveur web et ses fonctions intégrées au I-Stack™ [19]	87
Figure 6-7	Test en court-circuit du convertisseur entrelacé de 600 A (300 A par phase).....	88
Figure 6-8	Torche à plasma [39].....	89
Figure 6-9	Réacteur à plasma composé de trois torches [39]	90

Figure 6-10	Unité d'alimentation électrique (UAÉ) développée par Suez WTS.....	91
Figure 6-11	Exemple de contrôleur bang-bang mal ajusté	92
Figure 6-12	Exemple de démarrage agressif.....	93
Figure 6-13	Courant à la torche contrôlée.....	94
Figure 6-14	Mesure des courants L1 et L2 pour une consigne de 200 A	95
Figure 6-15	Mesures des courants L1 et L2 pour une consigne de 180 A sur la torche #1	95
Figure 6-16	Résultats expérimentaux des courants de sortie alimentant une torche à plasma	96
Figure 6-17	Limitation du courant à la suite d'une perturbation externe.....	98
Figure 6-18	Surintensité importante au démarrage nécessitant un arrêt	99
Figure 6-19	Menu pour l'ajustement des limites du courant	100

Liste des symboles

A	Ampère
CA	Courant alternatif
CC	Courant continu
DC	Courant continu (de l'anglais Direct Current)
IEEE	Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (Institute of Electrical Engineering Engineers)
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée (de l'anglais Insulated Gate Bipolar Transistor)
MLI	Modulation à largeur d'impulsions
PWM	Pulse Width Modulation
STATCOM	Compensateur synchrone statique (de l'anglais synchronous static compensator)
SVC	Compensateur statique d'énergie réactive (de l'anglais Static VAR Compensator)
V	Volt
PID	Correcteur Proportionnel, Intégral, Dérivé
W	Watt

Chapitre 1 - Introduction

1.1 Mise en contexte

L'ère de la révolution industrielle a été marquée par une modernisation positive de nombreux secteurs tels que les transports, la médecine, le militaire et plusieurs autres. Bien que ces avancements aient marqué à jamais les industries, ils n'ont pas été sans effet pour notre planète. Réchauffement climatique, gaz à effet de serre, pollution atmosphérique sont des termes qui n'ont pas cessé de faire surface au cours des dernières décennies. Il est grand temps de trouver des sources de production d'énergie et d'élimination des déchets alternatives et non polluantes si nous voulons conserver l'intégrité de la planète pour les futures générations.

La valorisation des déchets par procédé de gazéification à l'aide de torches à plasma semble être une solution favorable. Avec zéro émission de gaz à effet de serre, elle permet de transformer les déchets domestiques ou industriels en gaz de synthèse aux nombreuses utilités. Ce procédé de gazéification est possible grâce aux propriétés exceptionnelles des torches à plasma. Plus spécifiquement, une torche à plasma a pour fonction de transformer l'énergie électrique provenant d'une source de courant continu en énergie thermique pouvant atteindre des températures de procédé allant jusqu'à 25 000 degrés Kelvin [7].

Cette température, bien plus élevée que les systèmes de combustion conventionnelle qui frôlent en général les 3 000 K, lui permet de « dépasser certaines limites des systèmes actuels

en termes de robustesse, de coûts d'équipement et d'exploitation pour des applications liées à la conversion et la valorisation de biomasse et déchets » [10].

Les différents modes d'opération des torches à plasma leur permettent de faire fondre des métaux à point de fusion élevée, de détruire des déchets, de produire des matériaux aux propriétés uniques et le tout, à une vitesse très élevée attribuée à la température du procédé.

La formation et le maintien d'un jet de plasma à haute puissance sont possibles grâce à une source d'alimentation en courant contrôlée qui fournit l'énergie électrique nécessaire à la torche au plasma. Dans un système de torche à plasma « la partie redressement du signal électrique peut représenter à elle seule, 30 % du prix de la source électrique ce qui implique une électronique de puissance onéreuse » [10]. L'électronique de puissance est donc un élément important à considérer dans la conception globale étant donné qu'elle a un impact significatif sur le fonctionnement et la fiabilité des torches à plasma.

1.2 Problématique

Les torches à plasma sont parmi les plus puissantes charges électriques et sont constituées d'une cathode et d'une anode dans laquelle un gaz plasmagène conducteur d'électricité est introduit. Il en résulte la génération d'un arc électrique créé grâce à une source d'alimentation continue ou alternative appliquée au flux de gaz à haute pression nommé jet de plasma [25]. La cathode, généralement en forme de cône, présente un point de stabilité avec l'arc à la pointe. Cependant, la position de l'anode est perpendiculaire au flux de gaz et à l'axe « nozzle », ce qui l'expose à une très grande force de traînée dynamique. Cette interaction, qui se produit entre le gaz et le point d'attache de l'anode, crée une fluctuation continue de l'arc électrique, et est responsable de l'instabilité de la torche à plasma. La période de cette

perturbation dépend de la durée de transition entre les particules de pulvérisation et le jet de plasma qui varie habituellement de 0.1 à 1 ms [20].

Les cycles d'opération d'une torche à plasma sont également critiques et ont lieu au démarrage lors de la création de l'arc électrique, à l'atteinte du régime permanent, durant les cycles transitoires et à l'extinction de l'arc électrique. Ces cycles mettent en évidence les deux plus grands défis liés au fonctionnement des torches à plasma : réussir l'allumage par la création de l'arc électrique et le maintenir malgré les perturbations externes et l'instabilité causée par divers facteurs. Ces difficultés proviennent du fait que les torches à plasma sont comparables à une charge non linéaire d'une grande instabilité dont le schéma équivalent sera présenté et expliqué dans le chapitre 2.

1.2.1 Convertisseur DC-DC

Le choix de la configuration et de la conception de la source DC représente une décision importante dans la mise en place d'un système de torche à plasma étant donné que la puissance a un rôle primordial à jouer dans l'enthalpie du processus dont l'effet sera discuté dans le chapitre 2. De plus, ces caractéristiques électriques instables au démarrage et une fois le régime permanent établi font de leur design un véritable défi pour la conception d'une source d'alimentation efficace et adaptée à ce type d'application. Aussi, la performance globale de la torche est directement influencée par sa stabilité et se mesure par les propriétés électriques de l'arc électrique. Outre les perturbations auxquelles le jet de plasma est soumis, la stabilité joue un rôle important sur le chauffage des particules et la qualité du revêtement produit, dans les applications de production de poudres sphériques.

L'emploi d'une source DC est préféré à une source alternative puisqu'elle est moins polluante sur le réseau électrique du point de vue de l'effet « flicker », du facteur de puissance et du taux de distorsion harmonique comme le rapporte Ladoux.P, et al suite à leurs travaux. [18].

Le marché actuel offre une large gamme de choix en ce qui a trait aux sources de courant continu pour les applications à haute puissance. La distinction compétitive repose sur le développement d'un produit performant et fiable à prix compétitif. Ceci peut être obtenu à l'aide d'un choix judicieux de configuration de convertisseur favorisant l'optimisation des composants nécessaires ainsi qu'une méthode de contrôle simplifiée.

Les sources à courant continu ainsi que les méthodes de contrôle ont largement été élaborées au cours des dernières années. Dominant le marché de l'électronique de puissance depuis plusieurs décennies, les technologies à thyristor et à diode sont utilisées dans la majorité des sources d'alimentation DC à plasma et autres systèmes de puissances élevées. Ces types de convertisseurs sont destinés aux applications incluant des redresseurs de puissance à fort courant et dans les applications électrochimiques.

Bien qu'elle soit très populaire, cette technologie présente de nombreux inconvénients dans ce type d'application dus à leur capacité limitée à permettre l'allumage des torches, à leur vitesse de réponse lente et à leur faible capacité de résistance face aux perturbations externes et leur mauvaise qualité de l'onde [4].

Un autre problème lié à l'utilisation de thyristor concerne la stratégie de contrôle de phase sur ces redresseurs. Les fluctuations de tension de l'arc électrique produisent de grandes variations de la puissance réactive sur le réseau électrique d'alimentation. Pour pallier à ces problèmes connus et traités largement dans la littérature, les redresseurs à thyristor sont

souvent utilisés avec des compensateurs de puissance réactive (SVC) ou des compensateurs de type STATCOM tel qu'illustré à la Figure 1-1 [18].

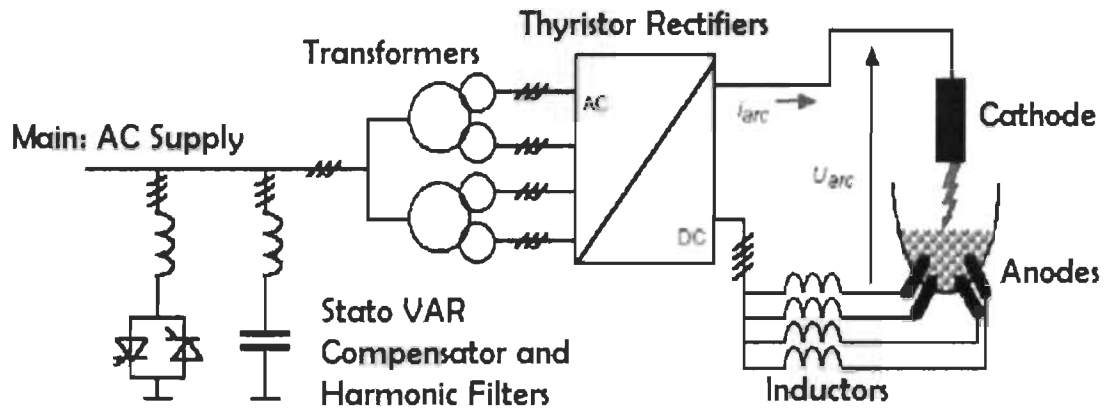


Figure 1-1 Schéma conventionnel d'une source DC avec compensateur STATCOM [18]

Les SVC se composent d'un banc de condensateurs servant de filtre anti-harmonique et d'un gradateur triphasé à thyristors, qui par la variation du courant dans des inductances, consomment la puissance réactive. Ils permettent aussi de compenser l'effet de clignotement (« flicker ») causé par une fluctuation de la tension électrique en raison des perturbations électromagnétiques.

Bien qu'ils permettent de produire une source de courant stable, ces types de compensateurs engendrent des coûts supplémentaires pour les industriels dus à l'achat, au remplacement de pièces et à la maintenance de ces équipements accessoires. Pour des applications de haute puissance, le coût des composants de base tels que les inductances et les condensateurs nécessaires dans ces compensateurs sont très élevés et font de l'équipement un produit peu compétitif sur le marché industriel. Il est donc primordial, dans le cadre d'un

produit industriel, d'optimiser les composants tout en leur octroyant les performances et la fiabilité requises.

Bien conscient de cet enjeu, [18] propose d'éliminer les compensateurs STATCOM et SVC à l'aide d'une stratégie de contrôle qui supprime l'effet « flicker » à l'aide d'un convertisseur AC/DC basé sur un redresseur à diodes suivi d'un hacheur muni d'un contrôle de puissance constant. Les inconvénients des diodes et des thyristors ont été traités ci-haut. De plus, cette étude a uniquement été validée en simulation et non sur une application industrielle.

Une autre solution existante dans la littérature est l'utilisation d'un convertisseur DC-DC à pont de diode à trois niveaux accompagnés d'un redresseur à diodes tel que proposé par [15] pour des systèmes de torches à plasma allant jusqu'à 3 MW. Ces derniers sont efficaces et peuvent assurer une ondulation sur le courant de sortie inférieure à 10% lors de fluctuations de la charge [15]. Étant donné qu'une tension élevée est requise pour le démarrage initial d'une torche à plasma, la configuration proposée comporte un circuit externe supplémentaire permettant de fournir jusqu'à 30 kV au moment de l'allumage. Ce circuit supplémentaire ajouté en parallèle au montage du convertisseur est également responsable d'éliminer le bruit et de compenser les perturbations externes. Encore une fois, des coûts supplémentaires sont engendrés par l'ajout d'un circuit externe. La méthode de contrôle est d'autant plus complexe puisqu'il faut gérer les deux circuits. Une fois encore, cette étude théorique ne semble pas avoir été validée et testée sur un système réel de torche à plasma.

D'autres topologies sont proposées telles que des redresseurs de ponts à thyristors ou de diode à multipulsions [18]. Ces configurations sont pertinentes, mais peuvent difficilement

permettre le réglage du courant. Ils ne permettent donc pas toujours l'allumage de l'arc ni son maintien en condition normale d'opération.

1.2.2 Contrôleur de courant

En ce qui a trait aux contrôleurs de courant, ces derniers, qui sont très utilisés dans les applications d'électronique de puissance, ont largement été étudiés et développés. Les contrôleurs PID restent les plus communs. Le contrôleur de courant proposé par [26] est basé sur un filtre construit sur une moyenne de valeur de courant. L'auteur l'implémente sur un convertisseur DC-DC entrelacé qui est sans doute la meilleure topologie pour les applications de torche à plasma en raison des nombreux avantages qu'il profère tel que présenté dans [6]. D'abord, leur configuration permet un contrôle adéquat et simple du courant, et ce, en réduisant le stress de commutation appliqué au convertisseur. Ils sont utilisés de différentes manières pour les applications à fort courant [6], mais selon les recherches effectuées dans la littérature, aucun concepteur n'a tenté de développer un contrôleur de courant sur un convertisseur DC-DC entrelacé possédant simultanément les exigences suivantes :

1. Configurer adéquatement et de façon optimale un convertisseur DC-DC entrelacé pour une application industrielle ;
2. Contrôler le courant de sortie à l'aide de deux boucles en parallèle pour une réponse adaptée selon la perturbation à laquelle le système est exposé;
3. Tester et valider sur des torches à plasma industrielles que la topologie permet d'obtenir une faible ondulation sur le courant de sortie;

4. Optimiser les composants électroniques ainsi que la méthode de contrôle afin de proposer un prix de produit concurrentiel.

1.3 Objectif

Ce travail a pour but de développer une source de courant contrôlée pour un réacteur à plasma qui sera utilisée dans le cadre d'un projet industriel réalisé par la compagnie Suez WTS à Montréal. Il est le fruit de plusieurs années de travail et de recherche appliquée en milieu industriel au sein du département de recherche et développement.

La source d'alimentation conçue dans le cadre de ce travail de recherche sera destinée à des applications industrielles utilisant la technologie d'atomisation du plasma pour la fabrication de revêtement et de poudre sphérique.

Le travail consistera d'abord à développer une topologie de convertisseur DC-DC accompagné d'un contrôleur de courant parallèle permettant de répondre aux critères de performances recherchées. Ces derniers sont d'abord la fiabilité du produit imposée par les clients industriels. Ensuite, la source de courant devra être stable et présenter une faible ondulation au niveau de la sortie. Le temps de réponse du contrôleur devrait être raisonnable de façon à permettre le maintien de l'arc électrique durant l'opération.

Enfin, des protections devront être mises en place afin d'assurer la sécurité des utilisateurs et des équipements. Les seuils de protection pourront être ajustés à l'aide de paramètres en fonction des conditions de chaque site d'installation.

Le convertisseur sera accompagné d'un contrôleur de courant en parallèle qui permettra de s'adapter aux petites ainsi qu'aux grandes perturbations externes.

1.4 Méthodologie

À la suite d'une étude bibliographique sur le fonctionnement des torches à plasma et leurs caractéristiques ainsi que sur les topologies des convertisseurs DC-DC et leurs contrôleurs, la topologie du convertisseur DC-DC entrelacé accompagné d'un contrôleur de courant sera proposée pour ces nombreux avantages qui seront analysés. L'objectif de ce travail sera atteint par le suivi des étapes suivantes :

1. Analyser et valider le comportement de la topologie choisie par simulation à l'aide du logiciel Matlab[®]/Simulink[™].
2. Modéliser le contrôleur de courant et vérifier les critères de performances requis.
 - ✦ Temps de réponse du système suite à différentes perturbations;
 - ✦ Qualité de la réponse et temps de stabilisation;
 - ✦ Stabilité et capacité à maintenir l'arc électrique;
 - ✦ Fonctionnement adéquat des boucles parallèles;
 - ✦ Ondulation sur le courant de sortie;
 - ✦ Fonctionnement des protections implémentées.
3. Programmer la méthode de contrôle sur la plateforme I-Stack[™] utilisée par Suez WTS afin d'assurer sa compatibilité avec les cartes processeurs utilisées.
4. Valider et tester le fonctionnement du système sur un banc d'essai développé dans le département de recherche et développement de Suez WTS.
5. Ajuster les gains des contrôleurs et des protections à l'aide de paramètres.
6. Effectuer des tests et valider le fonctionnement du système conçu une fois intégré au produit final sur un réacteur de torches à plasma en milieu industriel.

1.5 Organisation du mémoire

Ce rapport sera constitué de sept chapitres. Le deuxième chapitre abordera les généralités sur les torches à plasma, à savoir leur mode de fonctionnement, leurs caractéristiques et son circuit équivalent. Cela permettra de bien évaluer quelles propriétés le convertisseur devra posséder.

Ensuite, le troisième chapitre traitera de la topologie du convertisseur de puissance en mettant en évidence l'explication théorique de son mode de fonctionnement. Le quatrième chapitre sera consacré au contrôleur de courant, à sa méthode de programmation et à l'explication des protections du système.

Le cinquième chapitre portera sur les simulations théoriques et comportera une modélisation de la torche au plasma ainsi que du convertisseur et de son contrôleur. Le sixième chapitre sera consacré à la validation pratique et exposera les résultats expérimentaux obtenus.

Finalement, le dernier chapitre conclura ce travail en plus d'émettre des recommandations pour de futurs travaux dans ce domaine.

Chapitre 2 - Généralités sur les torches à plasma

Ce deuxième chapitre aborde les généralités sur les torches à plasma. Il traite de leur mode de fonctionnement, de leurs caractéristiques spécifiques et met en évidence certains domaines d'applications. Une démonstration du circuit équivalent est aussi présentée afin de comprendre le comportement détaillé aux différents cycles de vie. Cela permettra de mieux situer la problématique de ce projet et de comprendre les raisons menant à développer un tel système.

2.1 Mode de fonctionnement

Une torche à plasma a pour fonction principale de transformer l'énergie électrique fournie par une source de courant en énergie thermique par effet de Joule qui se produit lorsqu'un gaz nommé plasmagène entre en contact avec un arc électrique. Par définition, le plasma est décrit comme étant le quatrième état de la matière et représente à lui seul, près de 99% de l'univers par sa présence dans le soleil, les étoiles, l'ionosphère, etc. [7]. Les solides, liquides et gaz sont composés uniquement de molécules tandis que le plasma est composé de molécules, d'ions et d'électrons lui octroyant ainsi la plus grande énergie par unité de masse. Cette caractéristique explique qu'il est un excellent conducteur électrique capable de soutenir un arc électrique. La figure 2-1 illustre bien cette différenciation.

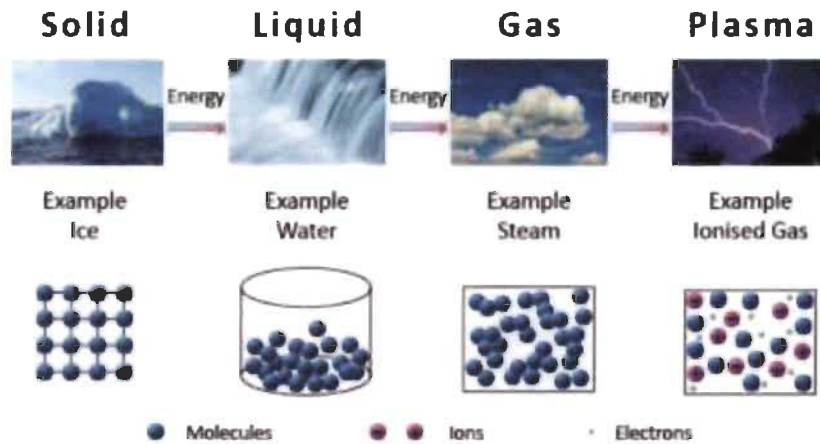


Figure 2-1 Les quatre états de la matière [35]

Tel que présenté à la Figure 2-2, une torche à plasma est composée de quatre éléments fondamentaux : la cathode, l'anode, l'injecteur de gaz et la source d'énergie.

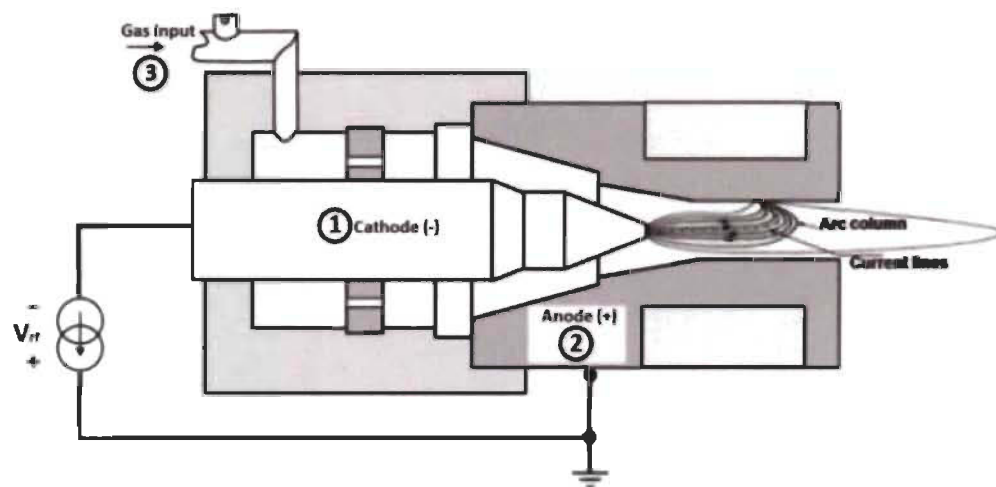


Figure 2-2 Schéma d'une torche à plasma [2]

La fonction de chaque élément est décrite ci-dessous:

- Cathode : Elle fournit les électrons nécessaires pour produire et maintenir un arc électrique à l'intérieur de la torche. La densité d'émissions de courant ($A.m^{-2}$) varie en fonction des paramètres définis par la loi de Richardson-Dushman qui est donnée par:

$$J = A_G T^2 e^{\frac{-W}{kT}} \quad (2-1)$$

Où :

J : Densité d'émission de courant [$A.m^{-2}$]

T : Température du métal

W : Fonction de travail du métal

k : Constante de Boltzmann ($k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

A_G : Constante définie par $A_G = \frac{4\pi m k^2 e}{h^3} = 1.20173 \times 10^6 \text{ [A.m}^{-2}.\text{K}^{-2}]$

Le métal le plus commun pour la conception des cathodes est le tungstène puisqu'il se caractérise par une très basse température d'opération, résiste à de hautes températures et possède un faible facteur d'érosion.

- Anode : À l'inverse de la cathode, l'anode a pour rôle de collecter les électrons afin d'assurer un flux de courant du circuit électrique jusqu'à l'arc de plasma.
- Injecteur de gaz : L'injection de gaz dans la torche se fait selon trois méthodes d'injection connues qui sont : l'injection axiale (a), radiale (b) et swirl (c) et dépendent du type d'application dans laquelle elle est utilisée puisque la vitesse du gaz varie selon le mode choisi. Ces trois modes sont présentés à la Figure 2-3.

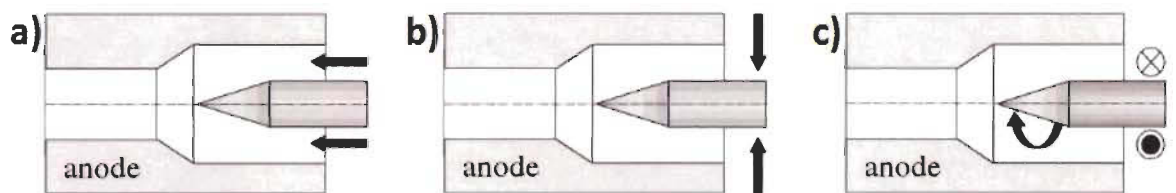


Figure 2-3 Mode d'injection du gaz plasmagène [2]

Dans le cadre de torche à plasma à courant continu dont il sera question dans ce travail, le mode d'injection utilisé est radial, c'est-à-dire que le gaz est injecté en parallèle à l'anode

ce qui donne une vitesse élevée au gaz au début de son introduction qui diminuera au fur et à mesure qu'il pénètre dans la torche.

Ainsi, lorsqu'un courant électrique est appliqué entre la cathode et l'anode et qu'un gaz plasmagène est soufflé entre ces deux éléments, un arc électrique se forme donnant naissance au jet de plasma représenté à la Figure 2-4. Celui-ci se forme à partir de la cathode qui est délimitée par une enveloppe isotherme et dont la température est supérieure à 7 500 K [2] et possède une conductivité électrique très élevée permettant le passage du courant électrique généré par la source. Cette couche qui se forme délimite l'arc de plasma et dépend du courant produit, du diamètre de la tuyère ainsi que du gaz utilisé.

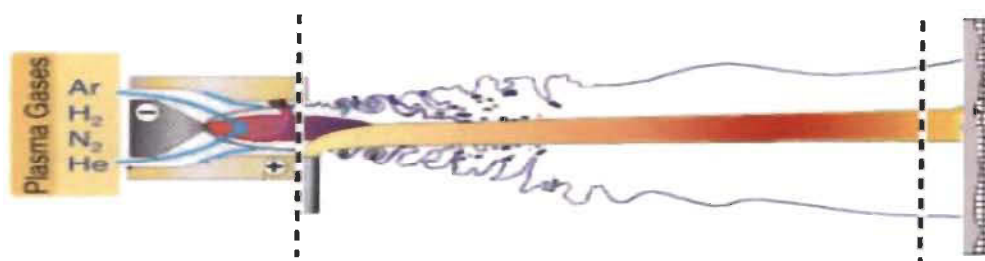


Figure 2-4 Représentation d'un jet de plasma [2]

Il existe plusieurs variétés de gaz plasmagène employé dans le cadre de la projection thermique dont les principaux sont l'argon, l'hélium et l'hydrogène. Le type de gaz choisi aura une influence sur les propriétés thermodynamiques de la torche et les caractéristiques de transport du plasma. De plus, les propriétés du gaz injecté déterminent « l'enthalpie, la conductivité électrique, la viscosité et la conductivité thermique » [2] de la torche à plasma. L'argon est très souvent utilisé dans les applications industrielles puisqu'il permet une

ionisation à plus faible puissance que la majorité des autres gaz plasmagènes tels que l'hélium et le diazote.

La caractéristique principale permettant autant d'applications variées est le fait que l'arc électrique peut atteindre de très hautes températures qui sont de multiples fois plus élevées que les systèmes de combustion conventionnelle dus à la présence élevée d'atomes excités. En plus de dépendre de la source d'énergie, la température est également fonction du gaz utilisé dans la torche à plasma. La Figure 2-5 présente la plage des températures en fonction du gaz plasmagène injecté dans la torche à plasma.

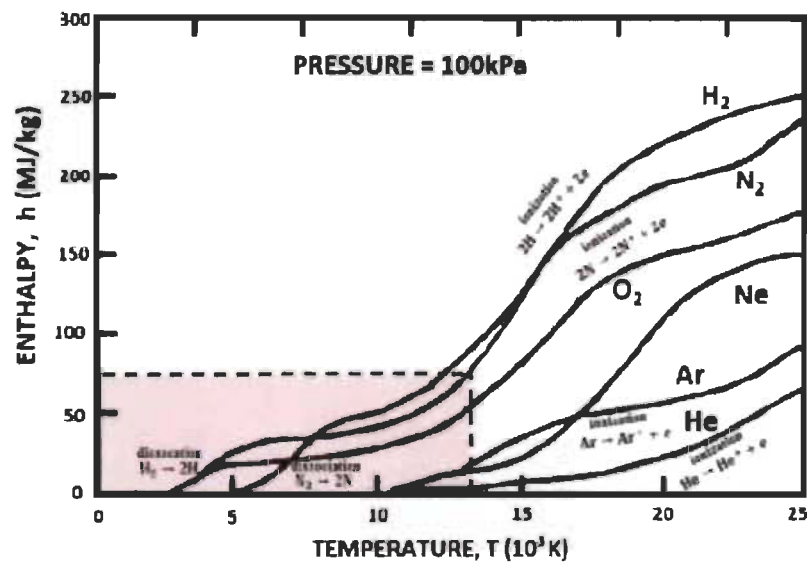


Figure 2-5 Température d'opération des torches à plasma selon le gaz plasmagène [2]

La création de l'arc électrique et donc, l'ionisation du gaz se fait grâce à une décharge thermo-ionique qui libère des électrons et produit le plasma suite à la collision des atomes du gaz électrique. Une fois l'arc établi, la source d'énergie doit fournir suffisamment de puissance pour maintenir l'arc et prévenir son extinction. Ce dernier est maintenu par une combinaison de puissance, de fréquence et de pression dans la torche. La Figure 2-6 illustre

la puissance et la fréquence nécessaire pour opérer une torche en régime permanent en fonction de la pression. Les quatre premières courbes sont pour l'argon tel qu'il sera utilisé dans ce projet les clients industriels. On remarque que la puissance est inversement proportionnelle à la fréquence du système.

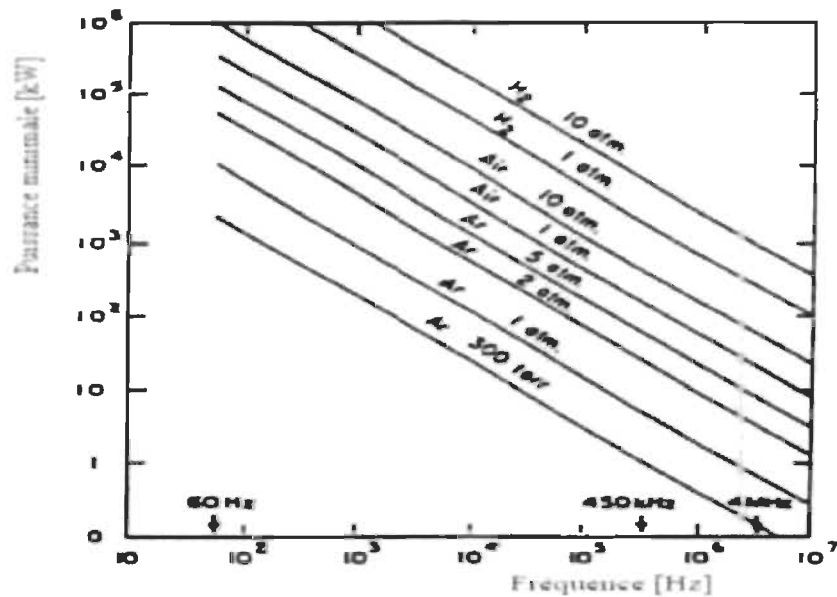


Figure 2-6 Puissances requises pour le fonctionnement d'une torche [7]

2.2 Exemples d'application

Les torches à plasma couvrent une large gamme d'application et peuvent être utilisées dans de nombreux domaines. Ceci est dû à leurs puissances de fonctionnement de plus de soixante-dix mégawatts et leurs températures d'opération très élevées [7].

Parmi les applications, on retrouve le procédé de gazéification, qui n'émet aucun gaz à effet de serre, qui consiste en une décomposition thermochimique permettant de transformer des déchets domestiques ou industriels en gaz de synthèse utilisé pour la production d'électricité ou encore en matériel de construction.

L'utilisation des torches à plasma ne se limite pas à ce domaine, leur puissante réaction leur permet de produire des poudres sphériques à partir de métaux tels que le titane ou le tungstène qui sont par la suite exploitées pour l'impression en trois dimensions dans la technologie de la fabrication additive [39]. La Figure 2-7 montre un exemple du résultat final de poudre sphérique de trois dimensions différentes mesurées en micro mètre.



Figure 2-7 Poudre sphérique de titane de différents diamètres [39]

Cette technique consiste à fabriquer des pièces métalliques à l'aide de poudres métalliques assurant une bonne densité et une grande uniformité d'empilement tout en conférant d'excellentes propriétés mécaniques. En utilisant de telles poudres, peu de restrictions sont imposées sur la forme des pièces et les coûts sont inférieurs à ceux de la machinerie. Ces pièces sont utilisées pour la conception d'appareils médicaux et dentaires, dans les industries automobiles, robotique, aérospatiale, etc.

Un exemple d'application médicale est la fabrication d'implants médicaux, de prothèses de genoux ou de hanches telles que présentées à la Figure 2-8.



Figure 2-8 Exemple d'implant médical pour la hanche réalisé par fabrication additive [24]

En aéronautique, cette poudre sert à la production de composants complexes requis pour la fabrication des avions tels que les capteurs, les pièces de satellites, etc. Elles sont également utilisées pour la fabrication de revêtements à froid et à chaud qui consiste à propulser des particules sur des pièces métalliques spécifiques pour différentes raisons telles que la prévention de la corrosion, le resurface, les scellants, etc. Finalement les torches à plasma sont aussi utilisées dans le domaine de la métallurgie, pour la fabrication de revêtements céramiques et pour le soudage de tôles.

2.3 Stades d'opération

L'opération de la torche à plasma se fait selon différents critères en fonction du stade dans lequel elle se trouve. On distingue trois cycles critiques qui sont l'amorçage de l'arc, les cycles transitoires et l'extinction de l'arc électrique.

La section suivante présente certaines problématiques rencontrées dans ce vaste domaine aux différents stades d'opération.

2.3.1 *Allumage des torches*

Outre les propriétés physiques dont il est primordial de considérer pour amorcer l'arc électrique, on retrouve les caractéristiques électriques non linéaires de la charge constituée de la torche à plasma. L'arc électrique d'une torche à plasma est difficile à générer au moment du démarrage pour les trois raisons suivantes [23].

- 1) L'arc nécessite une source d'alimentation capable d'émettre une très haute tension pour amorcer le phénomène.
- 2) Un courant élevé à basse tension est nécessaire pour maintenir l'arc généré en régime permanent.
- 3) La transition entre la tension élevée et le courant élevé à basse tension se fait très rapidement et n'est pas linéaire.

Ces conditions s'expliquent par le fait qu'avant la formation de l'arc, l'énergie électrique est transmise à travers le gaz dont l'impédance entre la cathode et l'anode est très élevée, ce qui permet à la tension d'augmenter rapidement. Une fois l'arc créé, l'impédance entre les électrodes est grandement réduite. La Figure 2-9 illustre bien le comportement de la tension et du courant au démarrage. On voit que [23] propose un système de torche à plasma possédant une tension d'amorçage de 6 kV pour une impédance de 9 500 ohms qui diminue rapidement au fur et à mesure que l'arc s'établit. Une fois l'arc créé, l'impédance est réduite à 2 000 ohms et la source de courant prend la relève afin de maintenir l'arc et le courant augmente linéairement tel qu'illustré à la figure 2-9.

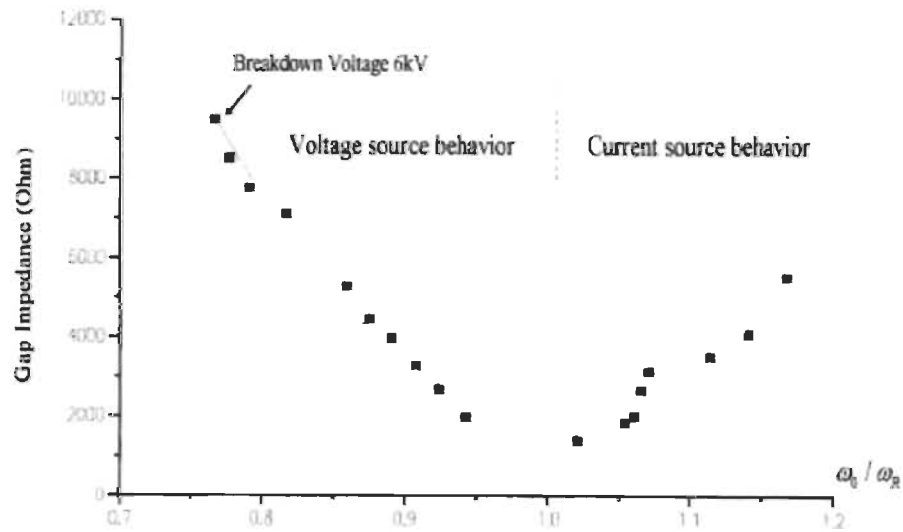


Figure 2-9 Variation de l'impédance pendant l'amorçage de l'arc [23]

Où ω_0 est la fréquence naturelle du circuit et ω_r , la fréquence de résonance.

2.3.2 Comportement du circuit équivalent

Afin de représenter le schéma équivalent et de mettre en valeur l'aspect non linéaire des torches à plasma [23] propose une étude comparative d'une inductance à laquelle on ajoute un noyau fait de plasma.

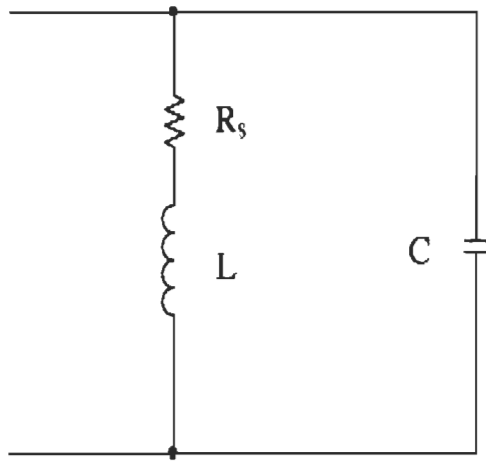


Figure 2-10 Circuit équivalent avant le démarrage [11]

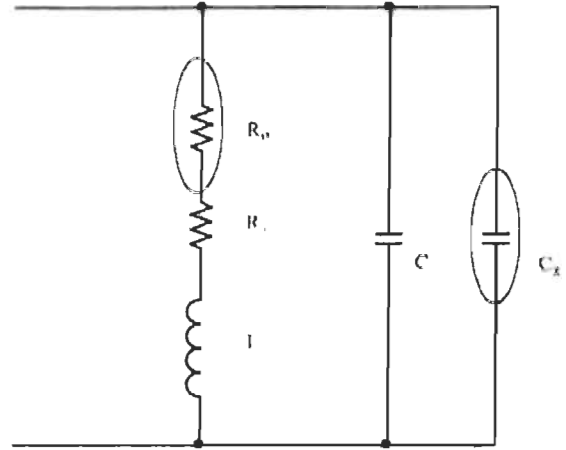


Figure 2-11 Circuit équivalent après le démarrage de la torche [11]

La Figure 2-10 représente le schéma équivalent d'une bobine qui est constituée d'une inductance L en série avec une résistance R_s ainsi que d'une capacité parasite en parallèle représentée par le condensateur C . De cette façon, la fréquence de résonnance du circuit est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R_s^2 C}{L}}, \quad (2-2)$$

qui peut être approximée par l'équation suivante étant donné que les valeurs de la résistance et du condensateur parasite sont faibles.

$$f_r \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-3)$$

La Figure 2-11 illustre le circuit dans lequel un noyau en plasma contrôlé par une source DC a été ajouté. Le condensateur C_x ajouté représente la capacité parasite qui se voit augmentée, car le noyau de l'inductance est maintenant un gaz conducteur plutôt que de l'air. La résistance R_p représente l'impédance de l'arc électrique ainsi formé qui s'ajoute en série

à la valeur d'inductance déjà présente. Les deux valeurs ajoutées sont proportionnelles à la densité d'électrons dans le plasma et dépendent du courant qui circule dans le plasma. Leurs valeurs sont données par :

$$R_p = K_p I_{dc} \quad (2-4)$$

$$C_x = K_x I_{dc} \quad (2-5)$$

Le comportement typique à l'allumage est présenté par [6] et le circuit se comporte tel que présenté à la Figure 2-12. Initialement, une onde de tension alternative à haute tension est envoyée pour permettre l'allumage de la torche. Étant donné que la fréquence est très élevée, l'impédance de l'inductance est très élevée et donc, le courant passe uniquement dans le condensateur du circuit de la Figure 2-11. Une fois la torche démarrée, une tension continue est alors envoyée. Puisque le condensateur bloque le courant continu, le courant passe par l'inductance qui se charge linéairement selon une pente V/L .

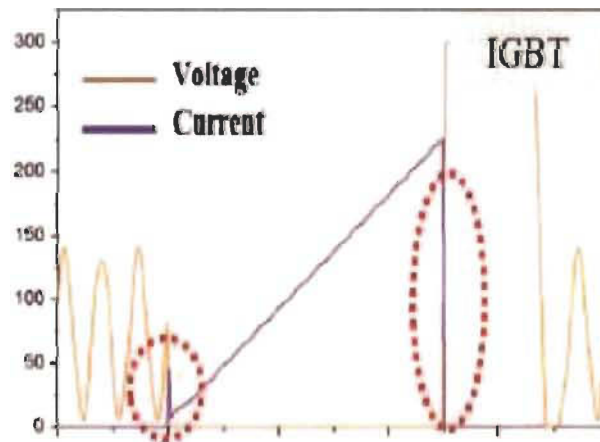


Figure 2-12 Mode discontinu d'opération à l'allumage de la torche [6]

2.4 Stabilité

En industrie, la rentabilité d'un tel système dépend grandement de sa capacité à répondre aux demandes de production qui peut parfois nécessiter une opération sans interruption pendant de longues périodes de temps. Les industriels recherchent un produit d'une grande fiabilité qui permet d'éviter les arrêts fréquents non justifiés. Or, la grande instabilité des jets de plasma rend cette tâche difficile puisqu'une mauvaise régulation de la source d'alimentation DC peut créer des arrêts réguliers et obliger les utilisateurs à réaliser des interventions de maintenance non désirées. Dans le cas d'applications de production de revêtements et de poudres sphériques dont il est question dans ce travail, il est bien connu dans la littérature que la stabilité de l'arc électrique a d'importantes influences sur la qualité du produit final [20].

Dans les applications de poudres sphériques, la production d'un revêtement de très haute qualité doit se faire de sorte que les particules de poudre reçoivent la même quantité d'énergie et sont donc chauffées, fondues, accélérées et déposées uniformément. Cette caractéristique importante est directement proportionnelle à la capacité de la torche à générer un flux de particules dont la température et la vitesse sont constantes. En d'autres mots, l'homogénéité du chauffage et l'accélération sont directement liées à la stabilité du jet de plasma. Étant donné que ce dernier présente de très larges fluctuations dues à différents phénomènes électriques et magnétiques, il est très difficile de maintenir un arc constant permettant d'assurer une bonne reproductibilité de la qualité des particules produites.

Afin de proposer une solution de stabilisation de l'arc, il est primordial de comprendre comment ce dernier fluctue en fonction de l'écoulement du gaz, de la température et des champs électromagnétiques. Bien que de nombreux outils existent aujourd'hui permettant de

mesurer la taille, la température, la vitesse des particules, etc. les travaux réalisés par [27] viennent agrémente grandement la littérature peu riche sur cette question.

2.4.1 Fluctuation de l'arc électrique

Le mouvement et la dynamique de l'arc de plasma jouent un rôle important sur la performance et la fiabilité du système. Ce mouvement qui peut sembler chaotique lorsqu'il est étudié en détail peut s'expliquer par divers phénomènes physiques. Tout d'abord, l'instabilité est en partie causée par le fait que l'anode, généralement en forme de cône, est perpendiculaire au jet de plasma, ce qui l'expose à trois grandes forces dynamiques résultant de l'interaction avec ce jet puissant qui causera des fluctuations continues de l'arc [28]. Afin d'obtenir une stabilité, un équilibre dynamique doit être obtenu entre l'interaction de ces trois forces auxquelles l'arc d'une torche à plasma en courant continu est soumis. Ces forces sont présentées ci-dessous :

- 1) La force de traînée : elle agit sur la colonne d'arc en raison de la vitesse élevée du gaz à la sortie de l'injecteur qui ralentit au fur et à mesure qu'il s'éloigne.
- 2) La force de Lorentz ou force électromagnétique : elle agit sur l'arc et provient du champ magnétique auto-induit généré par la source de courant électrique continu.
- 3) La dynamique du gaz plasmatisé : elle correspond à la quantité de mouvement produite par la décharge de l'arc sur la paroi magnétique.

L'interaction de ces forces peut se résumer par le comportement suivant : la propagation axiale du jet de gaz induit une vitesse élevée à l'entrée qui diminue progressivement dans la zone où la concentration d'ions sera la plus importante. L'arc de plasma tentera de se former entre les deux électrodes en empruntant le chemin le plus court. L'injection de gaz, étant variable, générera des variations de la position et de la trajectoire de l'arc.

À ce phénomène s'ajoute le champ magnétique induit par la source de courant qui perturbera l'arc en appliquant une force qui tentera de séparer les ions en électrons et en protons et qui causera, par le fait même, une déviation de l'arc. Une instabilité de l'arc influencera l'efficacité de la torche ainsi que la qualité du produit final.

2.4.2 *Érosion des cathodes*

Un autre facteur qui influence la stabilité de l'arc est l'érosion de la cathode qui provient de la chaleur très élevée qui se trouve entre l'extrémité de l'anode et l'arc électrique ainsi que l'évaporation continue du gaz plasmagène. Cette usure diminuera la vitesse d'écoulement du plasma puisque la densité de courant sera plus faible à la cathode [2]. Ce phénomène se produira après quelques dizaines d'heures d'opération seulement.

Ainsi, dans les mêmes conditions d'opération de la source DC, l'arc électrique sera plus faible puisque moins d'électrons seront disponibles pour le former. La Figure 2-13 présente la différence de tension entre une électrode neuve et électrode usée.

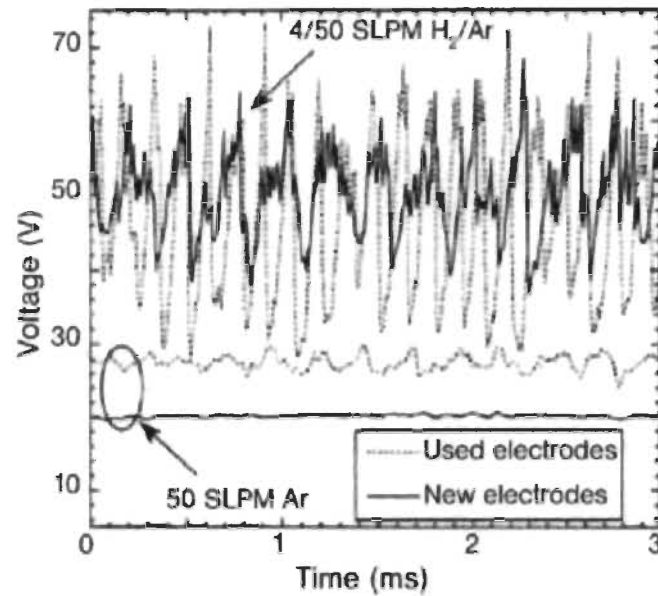


Figure 2-13 Différence de tension entre une torche neuve et usée [2]

2.5 Conclusion

Le deuxième chapitre de ce travail a permis de faire état des généralités sur les torches à plasma afin de comprendre brièvement la complexité de cette technologie et de son opération. Bien qu'elle soit utilisée dans de diverses applications, une étude approfondie du comportement de l'arc électrique est nécessaire afin de maîtriser le contrôle de la stabilité de l'arc. Comme discuté, les phénomènes physiques causant l'instabilité sont nombreux et prouvent la nécessité d'intégrer un contrôleur de courant afin d'améliorer les performances de la torche à plasma. Le chapitre suivant aura pour but de discuter des enjeux liés au convertisseur de puissance dans ce type d'application à haut courant.

Chapitre 3 - Topologie du convertisseur DC-DC

Ce chapitre détaille la topologie du convertisseur de puissance qui est mise en place dans le cadre de ce projet. Le montage du convertisseur DC-DC choisi est le « buck » entrelacé pour ses performances adaptées aux applications de source de courant continu élevé. En plus d'effectuer une conversion DC/DC, ce type de convertisseur donne un courant d'ondulation très faible, caractéristique importante et essentielle dans une application de torche à plasma vu l'étendue des perturbations auxquelles elles sont exposées. La question de qualité de l'onde sera abordée afin de mettre en évidence les performances que l'unité devra comporter. L'explication théorique du mode de fonctionnement de ce convertisseur sera également abordée.

3.1 Qualité de l'onde

Tel que mentionné précédemment, la partie liée à l'électronique de puissance et par le fait même, à la source d'alimentation électrique d'une torche à plasma représente environ 30% du coût du système complet. Différentes configurations de convertisseur DC peuvent être employées possédant chacune des avantages et des inconvénients, et doivent être sélectionnées en fonction du type d'application. Le choix d'un convertisseur approprié est essentiel pour éviter les nombreux problèmes rencontrés dans les systèmes de torches à plasma qui nuisent à son opération telle que des pertes d'énergie importante, une ondulation élevée à la sortie, une forte distorsion harmonique, un facteur de puissance très bas, etc. De tels problèmes auront pour conséquence une qualité faible de l'onde qui générera des frais

supplémentaires sous forme de pénalité ou de maintenance aux producteurs en plus de perturber le fonctionnement du système ainsi que le reste des équipements de l'installation partageant le même réseau électrique.

Comme discuté précédemment, une source d'alimentation continue ou alternative peut être utilisée pour les torches à plasma. La source continue sera celle étudiée et priorisée dans ce travail, car elle est beaucoup moins polluante pour le réseau électrique en ce qui a trait aux harmoniques et au facteur de puissance. Elle est aussi plus courante dans le domaine des sources de courant élevé et donc, préférée par de nombreux industriels.

3.2 Performances d'une unité d'alimentation

En matière de performance requise pour les convertisseurs, elle se divise en plusieurs critères tels que les caractéristiques de la tension d'entrée/sortie, l'ondulation sur le courant/tension, le facteur de puissance, la pollution harmonique, la fiabilité, l'efficacité, la fréquence de commutation, etc. Outre ces facteurs liés à la qualité de l'onde électrique, la conception d'un système industriel doit également tenir compte de facteurs dynamiques tels que les coûts d'exploitation/d'installation et d'investissement, les dimensions de l'installation, la modularité, la facilité de montage, etc. [8,30].

Ainsi, la conception d'une source DC pour des torches à plasma industrielle requiert une combinaison de l'ensemble des critères mentionnés, ce qui complexifie le choix de la meilleure topologie optimisée et adaptée pour ce type d'application.

Dans le cadre de ce travail, le facteur de puissance et le taux de distorsion harmonique ne seront pas traités, car un redresseur de type I-Stack™ développé par Suez WTS qui consiste en un convertisseur AC/DC à pont de six IGBT sera utilisé. Ce dernier fournira un signal

redressé aux performances inédites en matière de facteur de puissance quasi unitaire et un taux d'harmoniques respectant largement la norme IEEE 519 [40].

La sortie de tension continue de ce redresseur régulée est emmagasinée dans un banc de condensateurs qui constituera l'entrée du nouveau circuit développé dans ce projet.

3.3 Ondulation (« ripple ») sur le courant de sortie

Le choix de ce type de topologie repose sur un critère de performance très essentiel qui est une ondulation de faible amplitude sur le courant de sortie alimentant la torche. Pour l'alimentation des torches à plasma, le milieu industriel tolère une ondulation maximale de 10% selon le cahier de charge défini par le client. Au-delà de cette valeur, la variation du courant induite engendrera des variations de tension qui introduiront d'importantes perturbations dans l'arc électrique et par le fait même, des détériorations de la qualité du produit final dans la fabrication de poudres composites.

L'ondulation sur le courant est une perte de puissance et a de nombreux effets non désirables sur un circuit DC, notamment sur le chauffage des équipements, la distorsion, etc. L'ondulation n'est pas souhaitable dans les applications électroniques pour diverses raisons [31]:

- elle représente une perte de puissance;
- elle provoque un échauffement supplémentaire des composants dû au courant qui traverse les éléments parasites;

- elle nécessite que les éléments parasites des composants soient plus faibles et la capacité de dissipation plus élevée. Il en résultera un surdimensionnement des composants;
- elle peut réduire la résolution des instruments de mesure électroniques tels les oscilloscopes qui sera vu sous forme de motif à l'écran.

Différentes solutions existent pour réduire l'ondulation sur le courant et minimiser les effets indésirables. Les méthodes connues aujourd'hui et facilement applicables en simulation sont, par exemple, l'augmentation de la valeur des inductances de sortie afin de filtrer au maximum le courant de sortie. En application pratique, cette solution n'est pas conseillée puisqu'elle génère des frais supplémentaires dus à l'augmentation rapide du coût des inductances de puissance qui grimpe rapidement en fonction de leur valeur. Dans le domaine industriel, cette augmentation pourrait contribuer à la diminution de la compétitivité du produit final sur le marché en le rendant trop dispendieux. De plus, l'ajout d'une inductance de valeur plus élevée augmente la constante de temps du système, ce qui engendre un temps de réponse plus lent pouvant mener à une instabilité des boucles de contrôle selon la fréquence d'opération.

Une autre méthode de résolution est l'augmentation de la fréquence de commutation des transistors utilisés dans le convertisseur DC-DC. Cette deuxième solution occasionne des pertes importantes de puissance dues à la commutation dans les semi-conducteurs et par les courants de Foucault traversant les inductances. L'échauffement des composants a pour effet de diminuer la durée de vie des équipements.

La solution qui sera plutôt privilégiée dans ce travail consiste à étudier et à concevoir un convertisseur de type entrelacé dont l'utilisation est adaptée aux sources de courant continu élevées et au système à haute puissance.

Les performances du convertisseur sur lesquelles le travail sera axé et qui seront recherchées dans le développement sont :

- une faible ondulation sur le courant de sortie ($< 10\%$) ;
- une réponse dynamique rapide;
- une minimisation des pertes de puissance ($< 10\%$);
- une efficacité accrue du système;
- une minimisation des coûts par l'optimisation des composants électroniques;
- un système compétitif facilitant son intégration au marché industriel;
- un facteur de puissance de ligne élevé sur toute la puissance (> 0.95)
- une distorsion harmonique minimale ($< 10\%$).

3.4 Convertisseur buck-entrelacé

Les convertisseurs DC-DC « buck » ou hacheurs série sont très utilisés et sont présents dans différentes topologies couvrant une large gamme d'applications. La Figure 3-1 montre un exemple d'un convertisseur classique dont la commande alternera entre l'ouverture et la fermeture des semi-conducteurs S1 et S2.

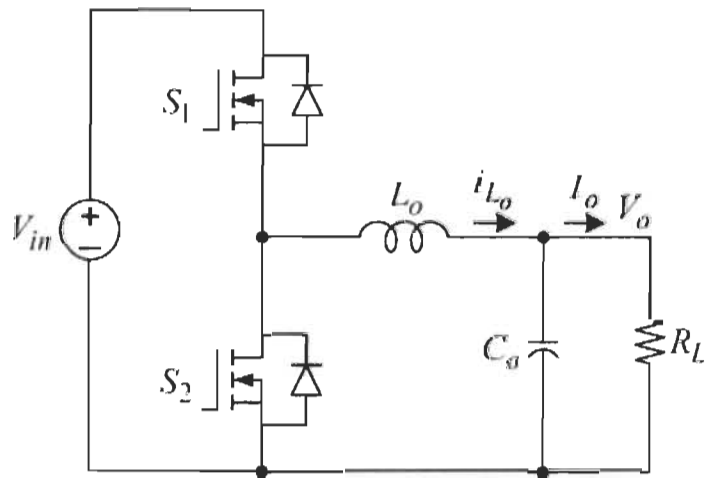


Figure 3-1 Convertisseur Buck classique [32]

Ce montage présente une limitation pour les applications à haut courant en raison de la perte excessive de puissance donnée par l'expression « i^2R » dans l'inductance et le niveau élevé d'ondulation sur le courant de sortie qui donné par l'équation suivante :

$$\Delta i_{L_o} = \frac{2D-1}{D}, D > 0.5 \quad (3-1)$$

La combinaison de plusieurs phases du convertisseur précédent donne naissance au convertisseur dit entrelacer qui peut avoir plusieurs phases. Son nom fait référence à l'entrelacement des courants qui se produit suite au déphasage de la commande envoyée aux transistors. La Figure 3-2 illustre le schéma électrique d'un convertisseur « buck » à deux phases dit « entrelacé ».

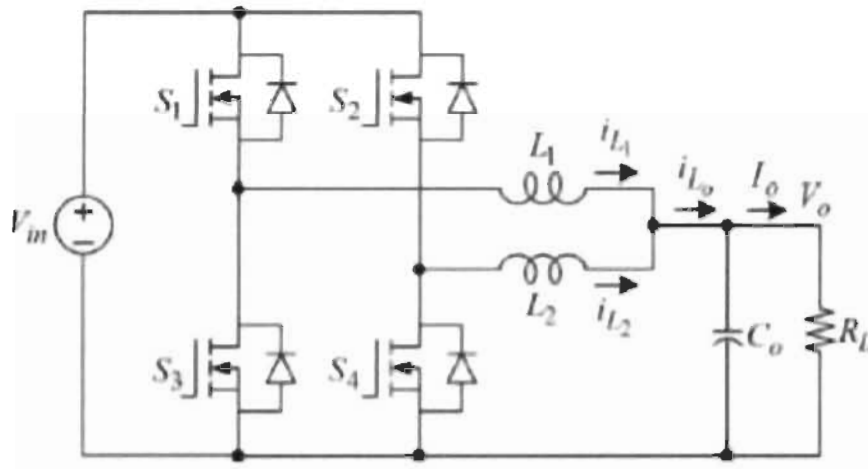


Figure 3-2 Convertisseur entrelacé pour l'alimentation de la torche à plasma [3]

Le montage de la Figure 3-2 montre la combinaison de deux cellules de commutation qui, lorsqu'elles sont mises en parallèle, permettent la réduction des pertes par conduction tout en augmentant la puissance du convertisseur. Pour obtenir ces avantages, les commandes des deux paires d'IGBT doivent être décalées entre elles de 180 degrés. De cette façon, le courant dans les transistors de puissance est réduit d'un facteur de deux puisqu'il est partagé entre les deux inductances. De plus, cet entrelacement doublera la fréquence de l'ondulation du courant.

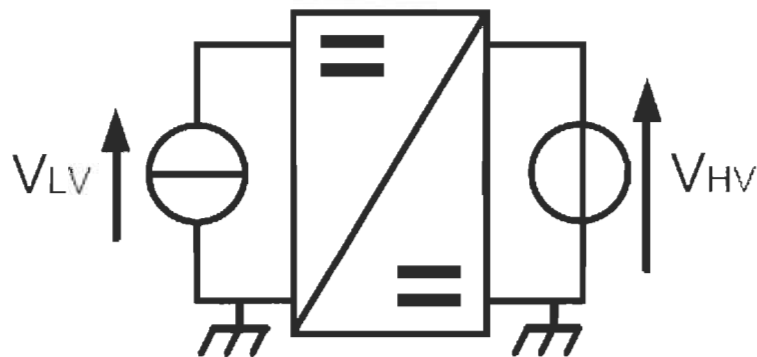


Figure 3-3 Convertisseur entrelacé à deux cellules de commutation [32]

La commande est réalisée sur les deux interrupteurs du haut. Les semi-conducteurs utilisés sont des IGBT. Afin de visualiser le comportement de ce convertisseur, la Figure 3-4 proposée par [3] montre la variation du courant i_{L1} traversant la première inductance, de i_{L2} traversant la deuxième inductance et i_{LO} , la sommation des deux courants. La commande est séparée en quatre modes d'opération qui est décalée de 180 degrés entre les deux branches de transistors.

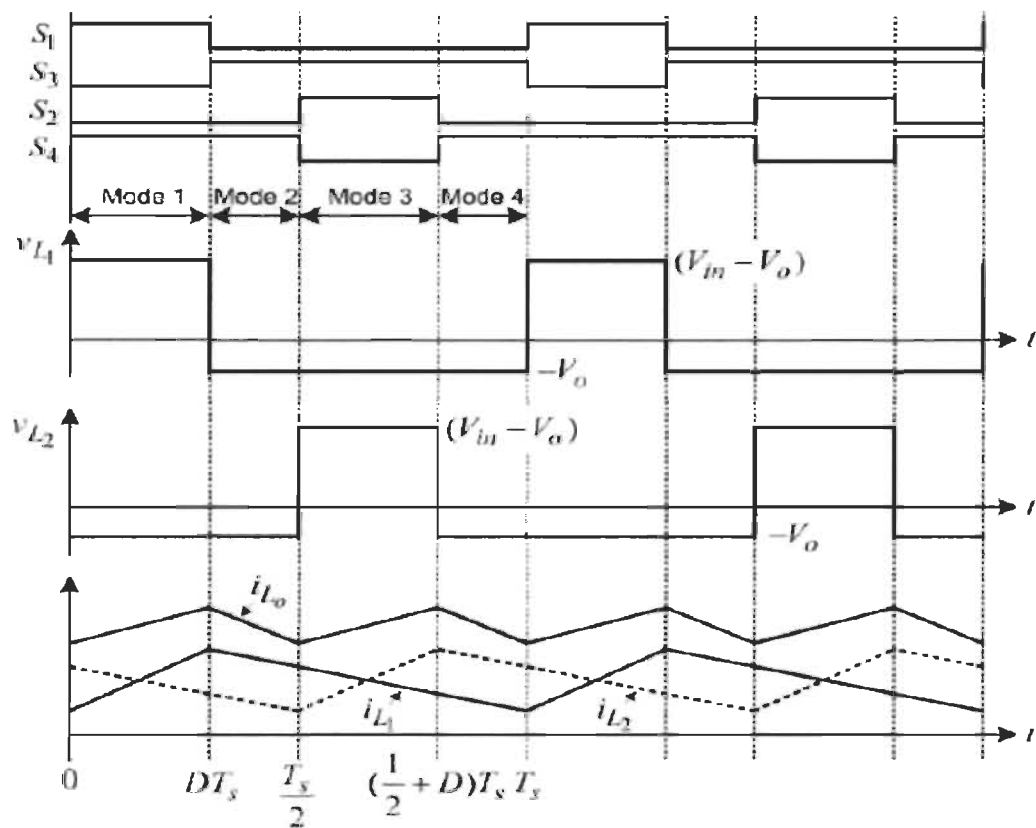


Figure 3-4 Comportement du convertisseur entrelacé à deux phases [3]

Dans ces conditions, l'ondulation des inductances est donnée par :

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_o}{L_1} (1 - D) T_s \quad (3-2)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_o}{L_2} (1 - D) T_s \quad (3-3)$$

Où :

- V_o : Tension à la sortie;
- L_1 : Valeur en uH de la première inductance;
- L_2 : Valeur en uH de la deuxième inductance;
- D : Rapport cyclique du signal de contrôle MLI (PWM);
- T_s : Période de commutation des interrupteurs (IGBT).

Les inductances des deux branches du circuit sont de même valeur et donc,

$$L_1 = L_2 = L \quad (3-4)$$

La valeur de l'ondulation de la combinaison des deux inductances sera donc donnée par :

$$\Delta i_L = \frac{V_o}{L} (1 - D) T_s \quad (3-5)$$

Étant donné que le courant de sortie est la sommation des courants i_{L1} et i_{L2} , le courant augmente dans le mode 1 et diminue dans le mode 2. Il y a répétition du même scénario dans les modes 3 et 4, ce qui cause le doublement de la fréquence du courant de sortie. De cette façon, l'ondulation sur le courant final de sortie est donnée par :

$$\Delta i_{Lo} = \frac{V_o}{L} (1 - 2D) T_s \quad (3-6)$$

Ainsi, l'équation précédente montre la réduction significative du courant d'ondulation avec l'utilisation d'un convertisseur entrelacé à deux phases dont l'effet de réduction maximale se produit lorsque le rapport cyclique est de 50%. Pour remarquer cet effet, le tableau ci-dessous

présente une comparaison des équations de calcul d'ondulation entre un convertisseur monophasé et biphasé.

Tableau 3-1 Comparaison de l'ondulation entre un convertisseur monophasé et deux phases

	Une phase	Deux phases
Ondulation courant inductance	$\frac{V_o}{L}(1-D)T_s$	$\frac{V_o}{L}(1-D)T_s$
Ondulation courant sortie	$\frac{V_o}{L}(1-D)T_s$	$\frac{V_o}{L}(1-2D)T_s$

La **Error! Reference source not found.** illustre bien la réduction de l'ondulation à la sortie suite à la sommation des courants de deux inductances couplées entre elles à 180 degrés. La sortie permet d'obtenir un courant continu de plus faible ondulation réduit d'un facteur de deux.

3.5 Séquences de commutation

L'étude de la section 3.2 a permis d'énoncer les avantages du convertisseur entrelacé et la pertinence de l'utiliser dans le cadre de ce projet. L'implémentation de la commande se fera sur une carte électronique développée par Suez WTS qui possède un processeur puissant fabriqué par STMicroelectronics doté d'un programme permettant l'interfaçage des différentes entrées et sorties physiques. Ce système est doté de plusieurs capteurs servant à

la mesure du courant, de la température, et de données nécessaires au contrôle. Des convertisseurs numériques à analogiques sont également utilisés pour la lecture et l'écriture de ces données. La Figure 3-5 présente une architecture globale du contrôle des sorties physiques des IGBT.

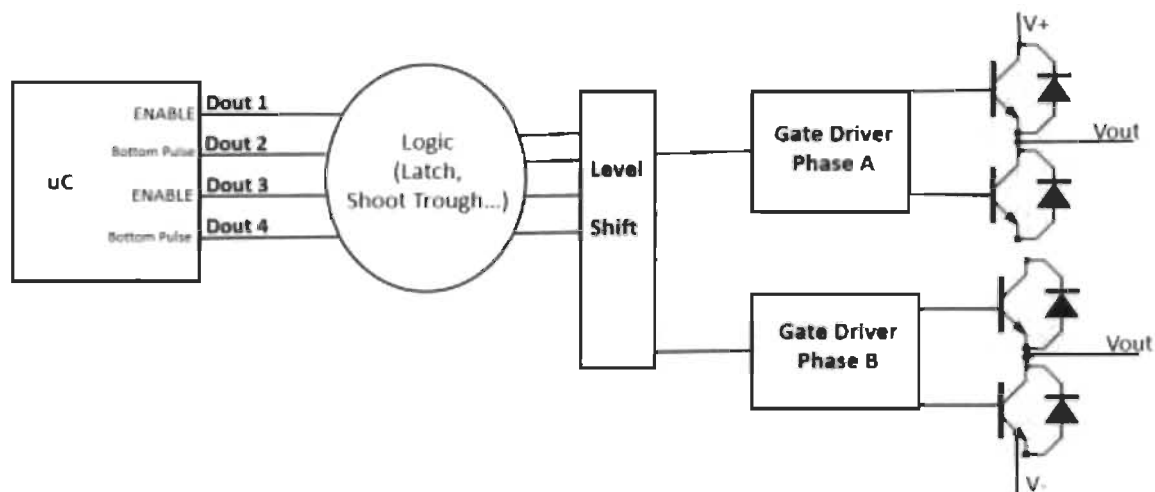


Figure 3-5 Schéma bloc de la génération des signaux

Les transistors sont contrôlés à l'aide des signaux numériques 1 à 4. Chaque paire d'IGBT possède deux entrées : soit le signal dit « enable » qui lorsqu'il est activé, permet au transistor du bas de suivre la commande de commutation présente dans la seconde entrée. Le transistor du haut lui, suivra l'inverse de la commande du transistor du bas. Le diagramme de la Figure 3-6 accompagné de sa table de vérité du Tableau 3-1 illustre bien le principe de commutation des IGBT choisis.

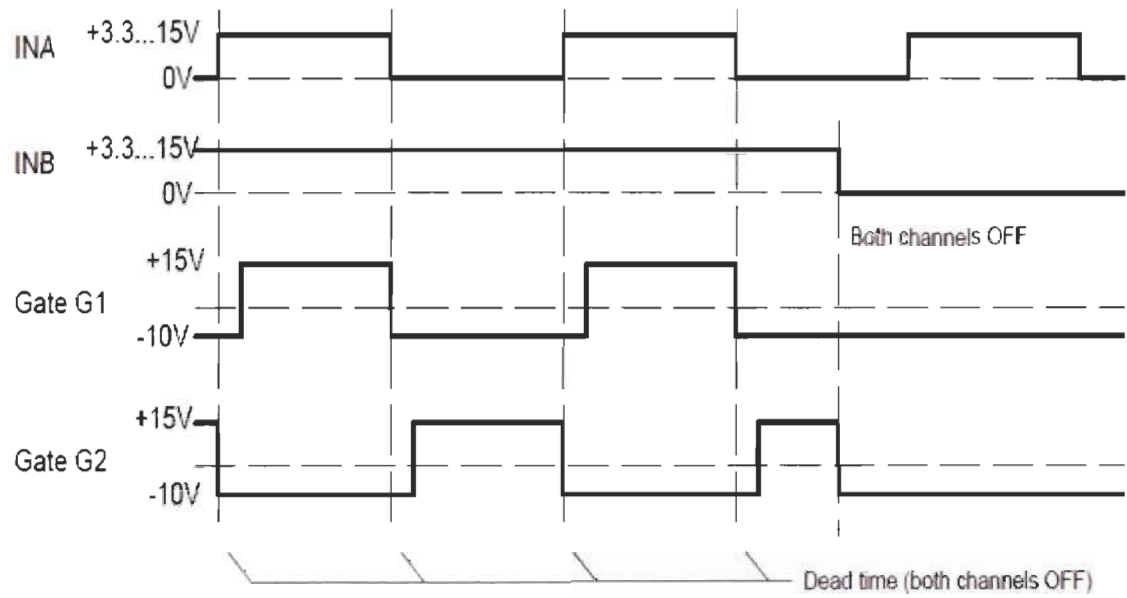


Figure 3-6 Mode de fonctionnement des signaux [33]

Tableau 3-2 Table de vérité du mode de contrôle des IGBT

Signaux		Transistor	
1 (Enable)	2 (Bottom)	Haut	Bas
0	0	Off	Off
0	1	Off	Off
1	0	On	Off
1	1	Off	On

3.6 Conclusion

Le troisième chapitre de ce travail a permis de voir et de comprendre la topologie du convertisseur permettant de répondre aux critères des applications à fort courant, et dans ce cas appliqué à l'alimentation des torches à plasma. L'influence de la qualité sur le produit final est la motivation principale à développer un système stable et efficace capable de respecter les points de consigne recherchés par les industriels. L'ondulation sur le courant de sortie sera importante à considérer pour limiter la perte de puissance. Des simulations démontrant les performances de cette topologie seront mises en évidence dans le chapitre cinq. Le prochain chapitre sera consacré à la technique de contrôle utilisée pour ce convertisseur.

Chapitre 4 - Commande du convertisseur et protection

Le quatrième chapitre est, en premier lieu, dédié à la description et au fonctionnement des deux contrôleurs qui serviront à réguler le courant de sortie du convertisseur entrelacé. La méthode de programmation ainsi que les critères essentiels à considérer dans les systèmes embarqués seront exposés. Finalement, il sera question d'expliquer et de mettre en évidence certaines protections du système qui seront implémentées.

4.1 Stratégie de commande

Définir une stratégie de contrôle adéquate et adaptée à une application spécifique est sans doute un élément clé pour la réussite d'un projet industriel d'une telle envergure. Cela s'explique par le fait que la stabilité de ce système non linéaire permettra d'obtenir la qualité désirée par les industriels.

4.1.1 Contrôleur PID

Le contrôleur de type PID est de loin la stratégie de contrôle la plus utilisée dans les systèmes asservis. Il est présent dans 90% [36] des boucles de contrôle et est majoritairement retrouvé sous forme de contrôleur PI. Ces performances et sa capacité à corriger l'erreur au fil du temps ont largement été discutées et prouvées [36]. Sa fonction principale est de calculer un signal de commande ou de correction visant à respecter les caractéristiques spécifiques du système quant à la commande désirée et les limitations physiques du procédé.

Sa réponse est basée sur un calcul dont la variable dépendante est l'erreur. Son algorithme est habituellement décrit selon l'équation ci-dessous :

$$u(t) = K_p (e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (4-1)$$

L'équation du contrôleur PID peut également être mieux visualisée grâce à un diagramme bloc tel que montré à la Figure 4-1.

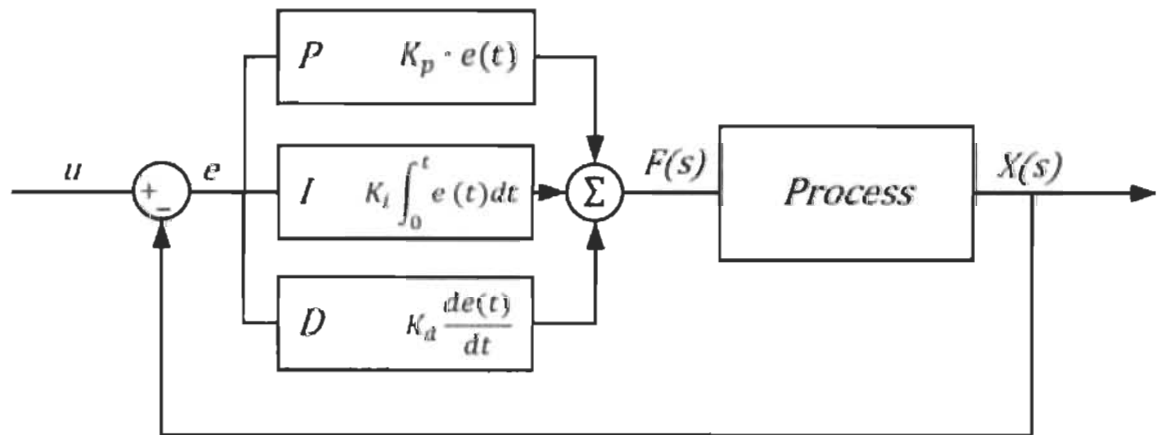


Figure 4-1 Diagramme bloc d'un contrôleur PID [37]

Où « e » est l'erreur du système soit la différence entre la valeur du point de consigne et la valeur du procédé, K_p le gain proportionnel, K_i le gain intégral et K_d le gain dérivatif.

Dans le cadre de ce travail, les gains du PID seront obtenus par la méthode empirique qui permet de définir les paramètres du régulateur à partir des observations expérimentales sur le procédé. La méthode proposée par [41] consiste à suivre les étapes définies ci-dessous :

- 1) Ajuster une valeur choisie de gain proportionnel qui limite l'oscillation du système et qui oscille à une plus basse vitesse que le temps de réponse désirée.
- 2) Ajuster le gain dérivé à une valeur 100 fois plus élevée que le gain proportionnel et régler pour éliminer l'oscillation en régime permanent.
- 3) Ajuster le gain intégral en choisissant une valeur de départ plus petite que le gain proportionnel (rapport entre gain proportionnel et dérivé).

Le contrôleur de type PID est principalement utilisé dans des conditions d'opérations normales et est très performant pour éliminer l'erreur en régime permanent en s'assurant que la valeur du procédé ne dévie pas du point de consigne demandé. Cependant, son efficacité est moindre lors d'une perturbation brusque ou à la suite d'un événement transitoire important. Afin de compléter ce contrôleur, un autre contrôleur à réponse plus rapide sera ajouté dans une boucle parallèle.

4.1.2 Contrôleur à hystérésis (ou Bang-Bang)

Le deuxième contrôleur choisit se nomme « Bang-Bang » ou contrôleur à hystérésis. Il s'agit d'un type de contrôle qui s'active ou se désactive de manière mécanique ou électronique lorsque la consigne souhaitée est atteinte. La figure 4-2 illustre bien ce comportement. Dans ce cas, il s'agira d'arrêter le contrôle ou la commutation des transistors lorsque le courant atteindra une valeur égale à la consigne plus ou moins une valeur delta définie, qui correspondra à la constante d'activation du contrôleur. Cette valeur sera paramétrable et pourra être ajustée en fonction des conditions d'opération du système.

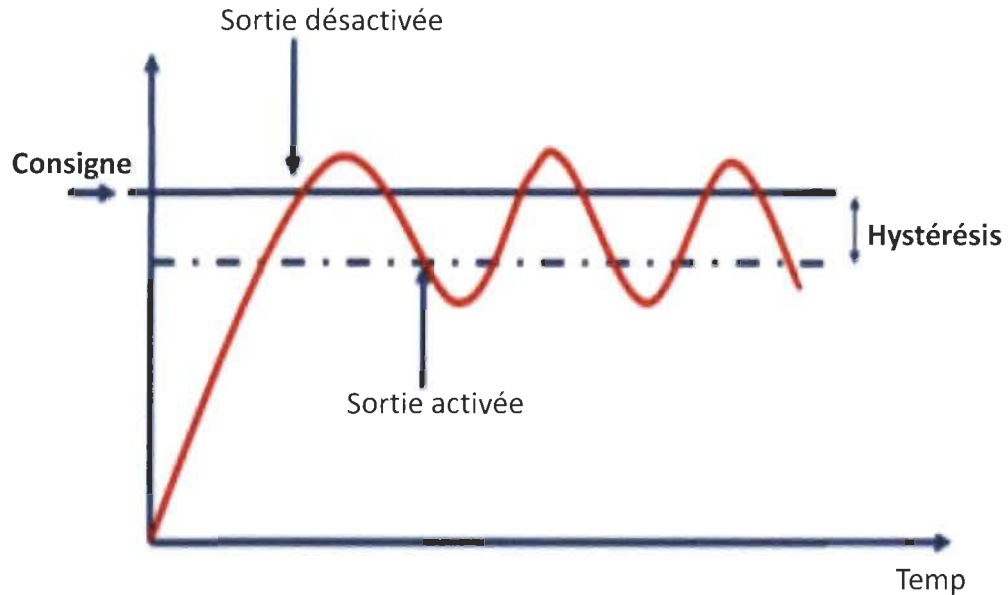


Figure 4-2 Contrôleur Bang-bang ou à Hystérésis

Sa réponse sera beaucoup plus brusque et moins précise, mais il permettra d'assurer une régulation lors de perturbations majeures telles qu'un changement de charge, ici représenté par un changement de débit de gaz dans la torche à plasma, ou suite à l'ajustement du point de consigne. Il permettra de ramener la valeur du procédé à l'intérieur de la fenêtre des limites imposées au contrôleur pour ensuite permettre au PID de reprendre le contrôle précis du système. Un exemple en simulation sera présenté dans le chapitre cinq.

4.1.3 Contrôleur parallèle

Une sélection entre les deux contrôleurs devra être établie en fonction de la valeur de l'erreur tel que présenté dans le diagramme de la Figure 4-3.

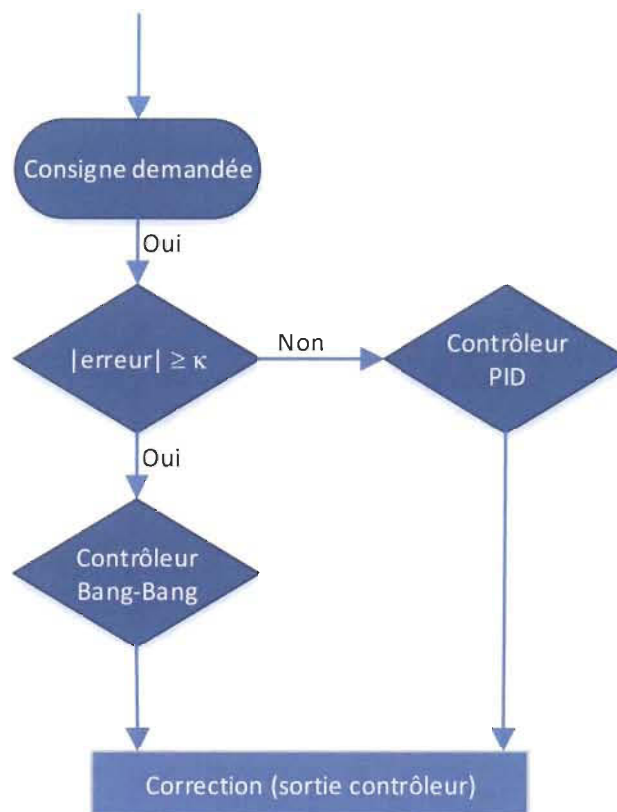


Figure 4-3 Diagramme de décision du choix de contrôleur

Le fonctionnement de cette table de décision se produit de la façon suivante : lorsque l'erreur est supérieure à la valeur de référence imposée, et donc à l'intérieur de l'intervalle d'action du contrôleur bang-bang, le choix reposera sur celui-ci qui ramènera la réponse du processus à une valeur près du point de consigne et qui l'empêchera de dépasser les limites du procédé et ainsi causer son arrêt. Lorsque le courant mesuré reviendra à l'intérieur de la plage délimitée, le contrôleur PID s'occupera d'éliminer l'erreur restante et de ramener le système à sa stabilité. La figure 4-4 montre comment les deux contrôleurs sont intégrés en parallèle.

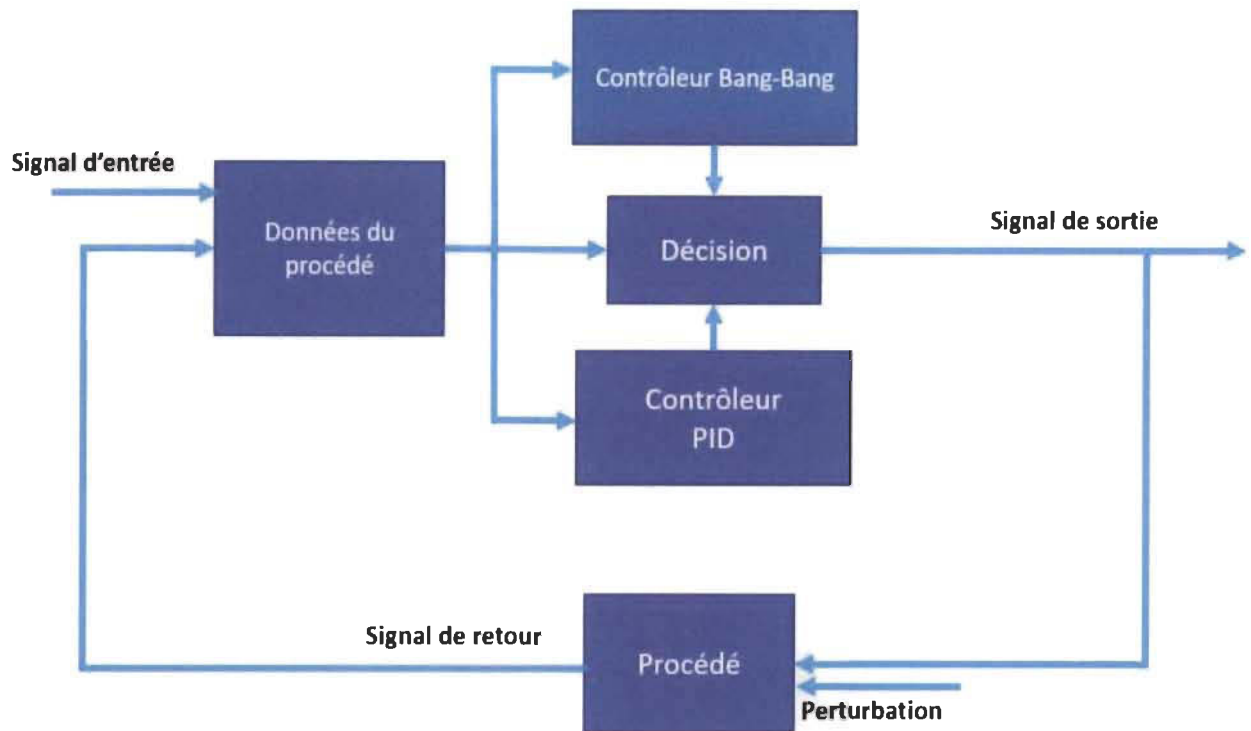


Figure 4-4 Intégration des deux contrôleurs

Ce contrôle sera réalisé indépendamment sur chacune des branches, c'est-à-dire que chaque sortie aura son propre contrôleur afin de faciliter la régulation du courant total. Il sera démontré dans le chapitre suivant qu'exercer un contrôle sur la sommation des deux branches, et par le fait même, sur le courant total de sortie est difficile étant donné que la régulation doit être également répartie sur les deux entités. Or, les composants électroniques non idéaux en pratique et ne se comportant pas exactement de la même façon seront difficiles à gérer adéquatement. Un contrôleur sera donc développé pour chacune des branches, et la commande sera décalée de 180 degrés pour les raisons mentionnées ci-haut.

Afin de réaliser le contrôle sur chacune des branches du convertisseur entrelacé, il sera nécessaire d'obtenir la valeur du courant sur chacune de celles-ci qui sera utilisé comme

signal de retour. Chacune des branches sera dotée d'un capteur de type LEM de 400 A permettant d'obtenir un signal analogique qui sera filtré et comparé avec la consigne. Les contrôleurs veilleront par la suite à ce que le courant lu corresponde à la consigne demandée.



Figure 4-5 Capteurs de courant installés sur chacune des branches [33]

4.2 Programmation de la méthode de contrôle

4.2.1 Programmation

Le logiciel de programmation utilisé dans le cadre de ce travail sera Simulink™ compilé en langage C grâce au compilateur de Matlab/Simulink et intégré dans une carte processeur développé par Suez WTS. Contrairement à une simulation, les systèmes embarqués opérant en temps réel sont limités par la capacité d'instruction que ces derniers peuvent exécuter dans un temps donné. Ainsi, il sera primordial de choisir des blocs Simulink et un type de données adaptées. À titre d'exemple, le bloc PID proposé par Simulink est très puissant et possède une multitude de fonctions lui permettant d'être utilisé dans des applications variées. Cependant, il comporte un nombre trop élevé de bloc et de logique qui ralentirait considérablement l'exécution des instructions par le processeur. La Figure 4-6 montre ce bloc, alors que la Figure 4-7 montre la logique nécessaire afin de reproduire sa fonctionnalité.

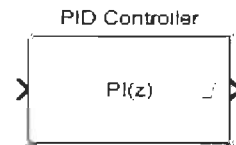


Figure 4-6 Bloc PID de la librairie Simulink

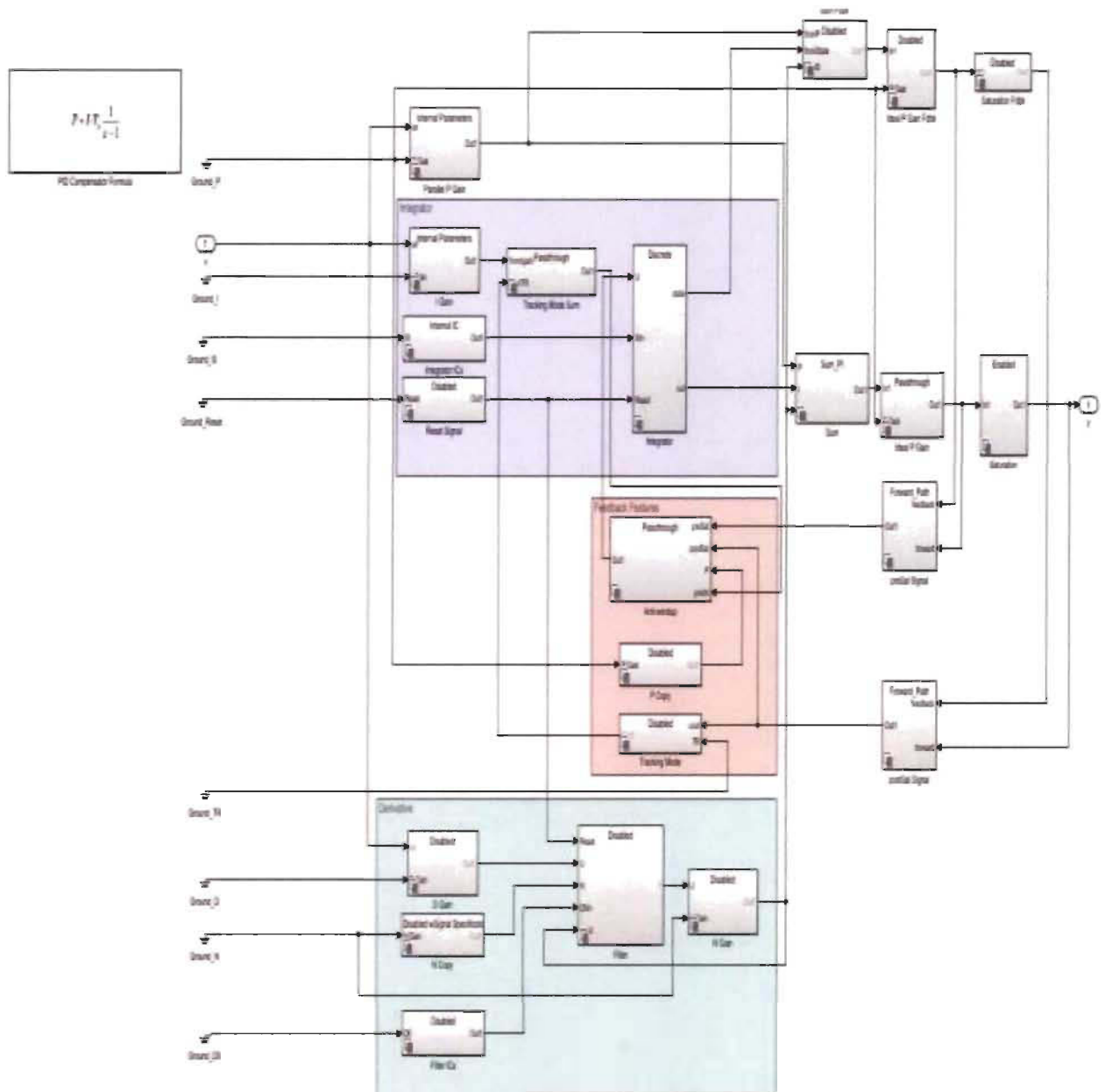


Figure 4-7 Bloc de logique nécessaire pour reproduire le bloc PID de la librairie Simulink

Ainsi le bloc précédent convient à une simulation qui n'impose aucune restriction de temps, mais pour le programme réel, le contrôleur PID devra être optimisé. Pour ce convertisseur, un contrôleur de type PI a permis de bien réguler le courant et possède de bonnes caractéristiques en termes de dépassement et de temps de stabilisation. Ce dernier sera implémenté à l'aide de bloc simple et optimisé permettant d'obtenir les mêmes résultats. La Figure 4-8 présente la logique utilisée tirée de son équation mathématique.

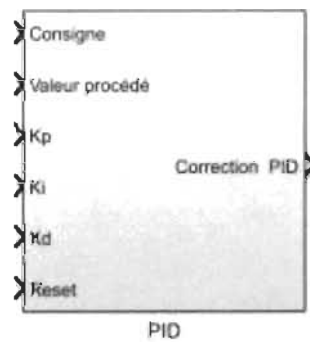


Figure 4-8 Conception d'un PID simplifié

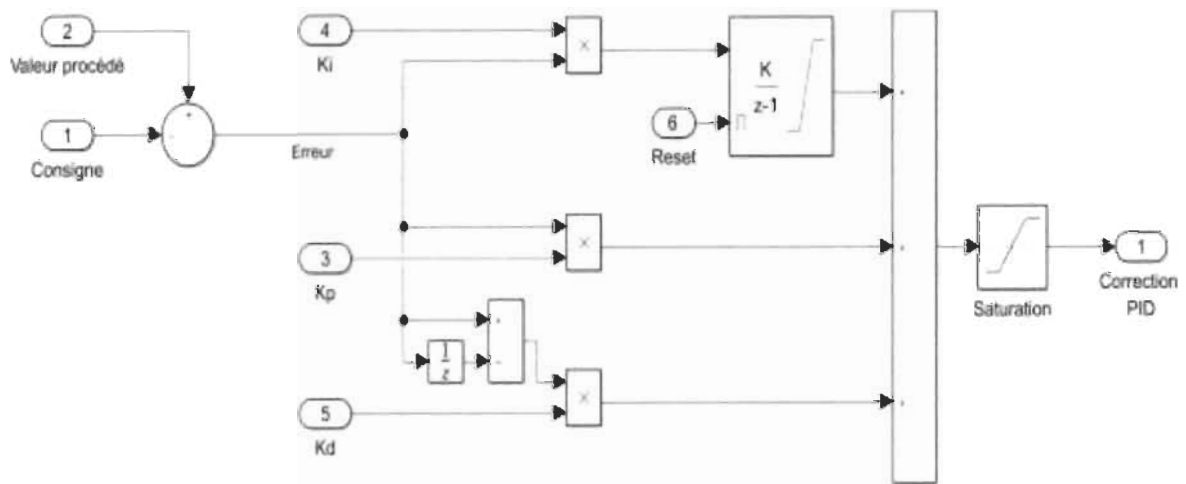


Figure 4-9 PID réalisé à l'aide de bloc simplifié

Comme il est possible de le constater, la fonction du PID est reproduite et optimisée de façon à limiter le code nécessaire pour reproduire sa fonctionnalité. De cette façon, seulement les fonctions utilisées seront intégrées au code, ce qui limitera le travail non nécessaire exécuté par le processeur. En optant pour des blocs de logique optimisés, la compilation du code est plus simple et réduit le temps d'exécution nécessaire des instructions par le processeur. De petites fonctionnalités peuvent être ajoutées si nécessaire telles qu'un bloc de saturation afin de délimiter la plage de réaction du PID.

4.2.2 Rampe générée au démarrage

Un contrôleur PID introduit généralement un dépassement lors des premiers cycles d'opération qu'il est possible de limiter et de réduire à l'aide des différents gains. En pratique, il est préférable d'éviter, si possible, un dépassement élevé étant donné que cela peut engendrer l'endommagement des équipements. À titre d'exemple, une mauvaise régulation du courant entraînant une augmentation dans les premières 100 ms du cycle peut être irréversible, contrairement à une simulation. Pour cette raison, une rampe graduelle sera implémentée afin de faire augmenter la consigne du courant progressivement au démarrage et d'éviter un dépassement important. La réponse du système et l'atteinte de sa consigne seront ralenties, mais permettront de démarrer dans des conditions sécuritaires.

Dans le chapitre 6, une simulation sera établie afin de comparer le résultat du démarrage avec et sans rampe progressive. La rampe qui sera utilisée dans le programme est montrée à la Figure 4-10. À partir du moment où la commande de démarrage est lancée, la valeur de la consigne qui est initialement zéro, sera augmentée progressivement par pas de 10 jusqu'à l'atteinte de la consigne. La consigne maximale est de 300A.

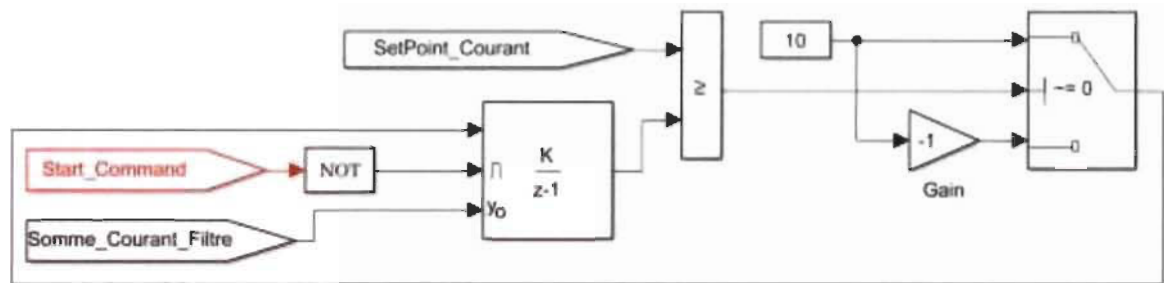


Figure 4-10 Génération de la rampe de la consigne de courant

4.3 Méthode de protection

Dans toute application industrielle, il est primordial de développer un système de protection ayant pour but d'assurer la sécurité des opérateurs, des utilisateurs ainsi que des équipements. Plusieurs dispositifs de protection sont intégrés dans les I-Stack™ tels que l'arrêt d'urgence, des fusibles, des disjoncteurs, des sondes de température, etc. On retrouve également des protections logicielles qui visent à limiter les bris de l'équipement et à informer l'opérateur en cas de défaillance ou de conditions non usuelles. En général, la réaction à privilégier est l'arrêt automatique du système qui constitue un état sécuritaire. Une intervention sera alors nécessaire suivi de l'acquiescement de la condition de faute ayant causée l'arrêt. Un exemple typique serait un changement important se produisant dans la ligne électrique d'alimentation qui pourrait faire varier la fréquence de ligne et ainsi générer un courant élevé. Après avoir dépassé la limite de courant définie, un arrêt imminent sera nécessaire pour éviter l'endommagement des composants électroniques.

Les arrêts fréquents des systèmes en marche ne sont pas très appréciés par les industriels puisque cela peut occasionner des retards dans la production. Il est important en tant que concepteur d'évaluer adéquatement si des solutions intermédiaires peuvent exister pour des problèmes liés à un événement transitoire.

Pour ce travail, une protection logicielle suite à un courant trop élevé a été développée. Elle consiste à arrêter la commutation des IGBT pendant un court instant afin de permettre au courant de diminuer sous le seuil de limite. Après le retour à une valeur normale, la commutation des transistors peut reprendre normalement. Ainsi, un évènement perturbant d'une courte durée ne causera pas un arrêt non désirable et non nécessaire du système durant l'opération. Si cependant, l'augmentation du courant s'étend sur une plus longue période de temps défini dans les paramètres, un arrêt sera nécessaire.

4.1 Conclusion

Ce quatrième chapitre a permis d'exposer les différents types de contrôleurs nécessaires pour la régulation du convertisseur DC-DC entrelacé qui a été défini dans le chapitre trois. La stratégie de contrôle doit être bien implémentée afin d'assurer la fiabilité du produit et de satisfaire les critères de performance recherchés par les industriels. Pour ce faire, la programmation doit être faite de manière concise et optimisée pour faciliter son exécution.

En plus de la fiabilité, la sécurité des équipements est une composante essentielle à la réussite d'un produit de qualité. Il faut tenir compte des différents risques et dangers auxquels les opérateurs ainsi que les équipements sont exposés afin de minimiser les conséquences. Le prochain chapitre démontrera une série de simulation réalisée afin de confirmer les différents principes expliqués dans ce chapitre.

Chapitre 5 - Simulation théorique

Le cinquième chapitre de ce travail présente les simulations effectuées dans le cadre de ce projet du convertisseur entrelacé, de son mode de contrôle ainsi que du fonctionnement de certaines protections implémentées. Tout d'abord, une modélisation du comportement d'une torche à plasma telle que définie dans le chapitre deux est montrée afin de permettre la visualisation de son mode d'opération et l'évolution du courant et de la tension au cours du processus. Ensuite, une simulation du modèle de base du convertisseur est démontrée ainsi que le contrôleur de courant associé. Finalement, un exemple de la réaction des protections en régime transitoire est étudié.

5.1 Modélisation du comportement d'une torche

Comme présenté dans le chapitre deux, une torche à plasma est avant tout une charge non linéaire dont les caractéristiques de tension et de courant varient selon son stade d'opération. Cette variation est surtout présente au démarrage, avant la formation de l'arc électrique, étant donné que l'impédance de la charge est très élevée et comparable à l'impédance de l'air. Ceci est dû à l'absence d'arc électrique qui représente un circuit ouvert entre la cathode et l'anode. Une fois le gaz ionisé et l'arc formé, l'impédance entre les deux éléments est très faible, et comparable à un court-circuit qui se forme entre les éléments.

La Figure 5-1 représente la modélisation d'une torche à plasma réalisée à partir du logiciel Matlab/SimulinkTM. Le bloc du haut illustre la torche, le bloc du bas son contrôleur de courant et le bloc de droite, une modélisation des inductances de sortie. Des délais ont également été ajoutés afin de représenter les retards réels liés à la disponibilité des données. Ces derniers peuvent être expliqués par le fait que les outils utilisés pour mesurer les valeurs de retour nécessaire au contrôleur présentent des retards dus à leur acquisition, leur traitement et leur transmission. Il est important de considérer ces délais dans une modélisation, car autrement, le logiciel prendra en considération que les données sont immédiatement disponibles au moment requis, ce qui est bien différent en pratique. Il pourrait ainsi donner des résultats erronés et non reproductibles dans un système réel.

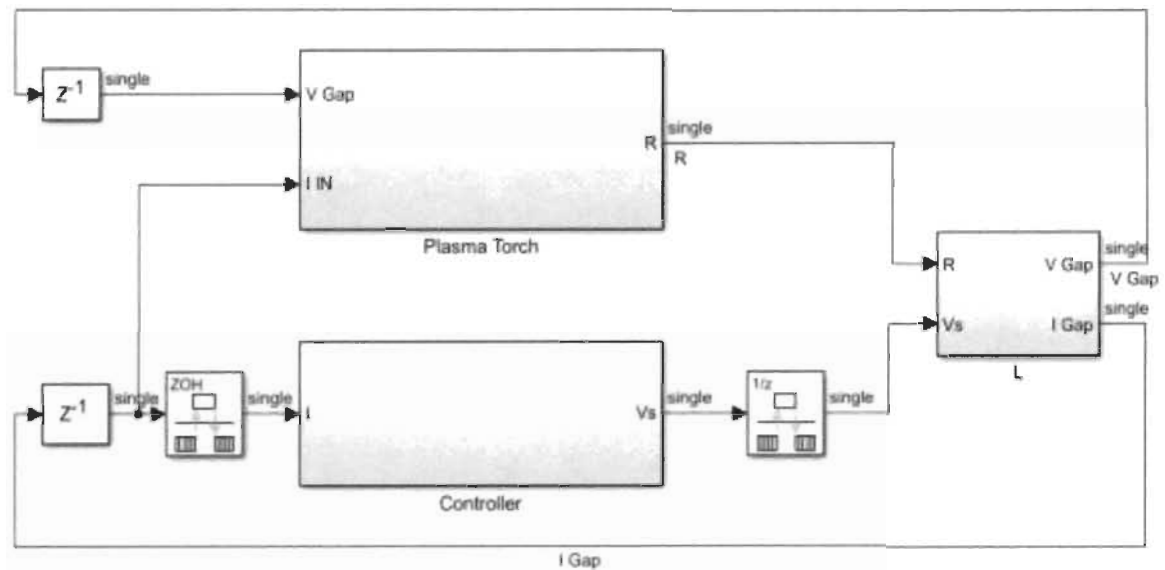


Figure 5-1 Schéma de modélisation d'une torche à plasma et de son contrôleur

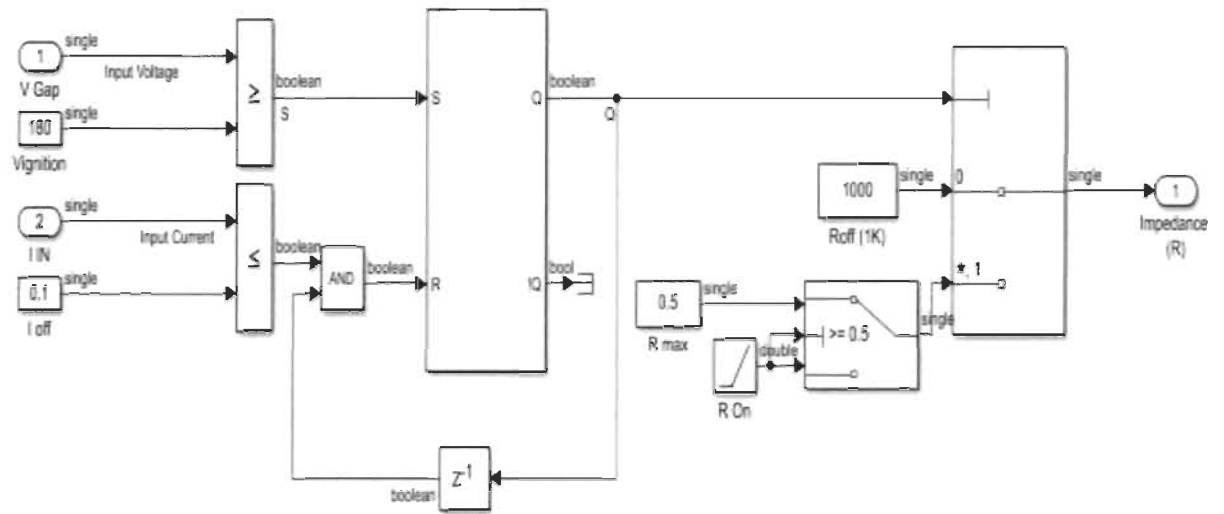


Figure 5-2 Modélisation de la torche à plasma

Pour représenter le phénomène de la création de l'arc électrique, la simulation est démarrée avec une résistance très élevée de 1 000 ohms. Pendant ce temps, le courant est de zéro ampère puisque ce dernier ne peut pas passer dans un circuit ouvert. Une tension alternative est alors envoyée entre les 2 éléments. L'introduction du gaz plasmagène formera l'arc électrique qui, une fois établi, diminue l'impédance brusquement et fait augmenter très rapidement le courant de la torche. Le contrôleur doit donc réagir rapidement afin de maintenir le courant au point de consigne demandé. L'introduction du gaz plasmagène crée par la suite une impédance telle qu'il est possible de le constater à la Figure 5-3.

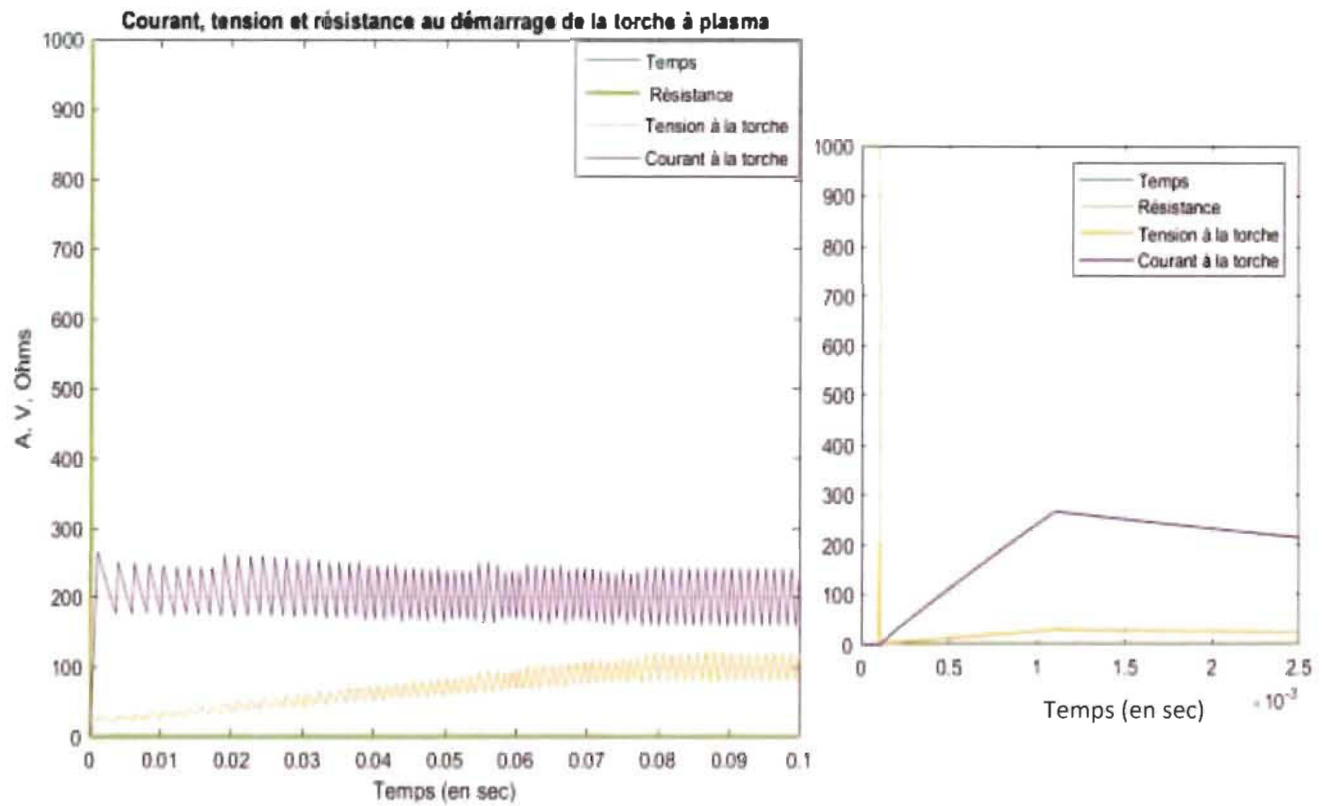


Figure 5-3 Résultat de la simulation de la torche à plasma

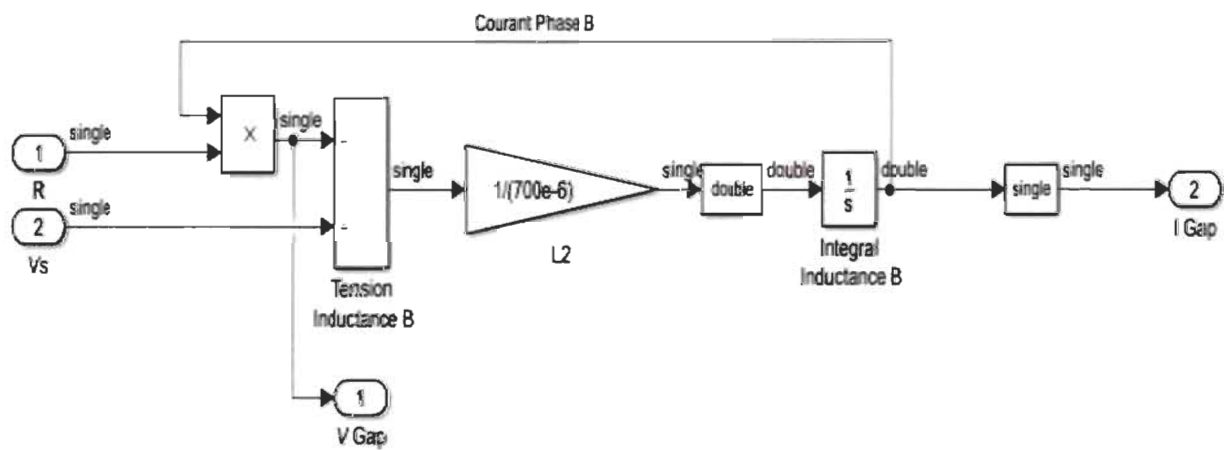


Figure 5-4 Modélisation des inductances de sortie selon leur définition

Afin de modéliser adéquatement et de comprendre le rôle de l'inductance dans le circuit électrique, la simulation a été réalisée à partir des équations mathématiques permettant d'obtenir le courant traversant une inductance. Ces équations sont présentées ci-dessous.

Tel que connu de la théorie des circuits électriques, l'équation du courant d'une inductance est donnée par :

$$v dt = L di$$

Le courant traversant l'inductance peut être obtenu en intégrant chaque côté de l'équation :

$$L \int di = \int v dt \quad (5-1)$$

On obtient ainsi le courant :

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v d\tau + i(t_0) \quad (5-2)$$

Qui peut être simplifié de la façon suivante, lorsque $t_0 = 0$.

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v d\tau + i(t_0) \quad (5-3)$$

L'équation ci-dessus permet ainsi de comprendre l'agencement des blocs de la modélisation du courant de l'inductance de la Figure 5-4.

5.2 Simulation du convertisseur entrelacé

La deuxième partie consiste à montrer les étapes de simulation du convertisseur entrelacé. La Figure 5-5 illustre le montage du convertisseur simulé. Afin de balancer le courant dans les deux branches de l'inductance, seulement les interrupteurs du haut seront utilisés et

commuteront. En ce qui concerne la branche du bas, les diodes de roue libre seront utilisées pour permettre un chemin de retour au courant dans chacune des branches. Les résistances R1 et R2 en série avec les inductances L1 et L2 ont été ajoutées pour reproduire l'effet de la résistance parasite de fuite associée à chacune des inductances présentes dans un composant réel et ont pour but de se rapprocher du comportement pratique d'un tel circuit. Sa valeur est de 0.1 ohm et limite légèrement le courant.

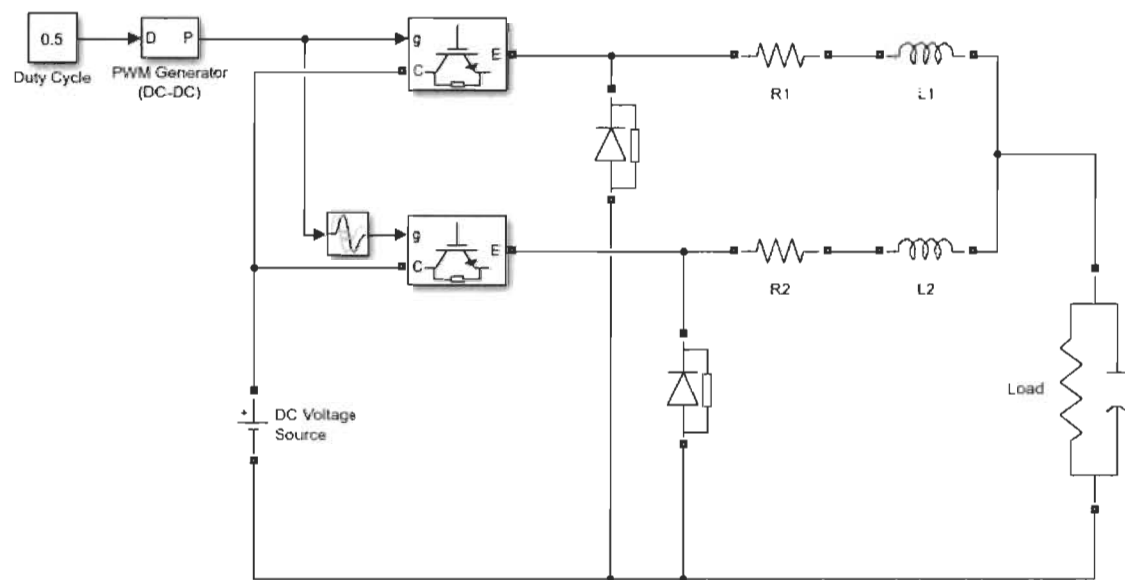


Figure 5-5 Simulation du convertisseur entrelacé

La valeur des composants électriques utilisés lors des simulations est présenté dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 Valeur des composants utilisés pour les simulations du convertisseur

Composants	Valeur
Résistance R1	0.25 ohm
Résistance R2	0.25 ohm
Inductance L1	800 uH
Inductance L2	800 uH
Résistance charge	1 ohm
Condensateur charge	1 uF

5.2.1 Commande non décalée

Dans un premier temps, une commande à modulation de largeur d'impulsions de type MLI (PWM) à rapport cyclique constant de 50% est imposée afin de valider le comportement du circuit. Cette dernière devrait permettre d'obtenir la même valeur de courant dans les deux branches de sortie. La charge utilisée est une résistance simulant l'impédance de l'arc électrique. Le résultat ainsi obtenu est présenté à la Figure 5-6.

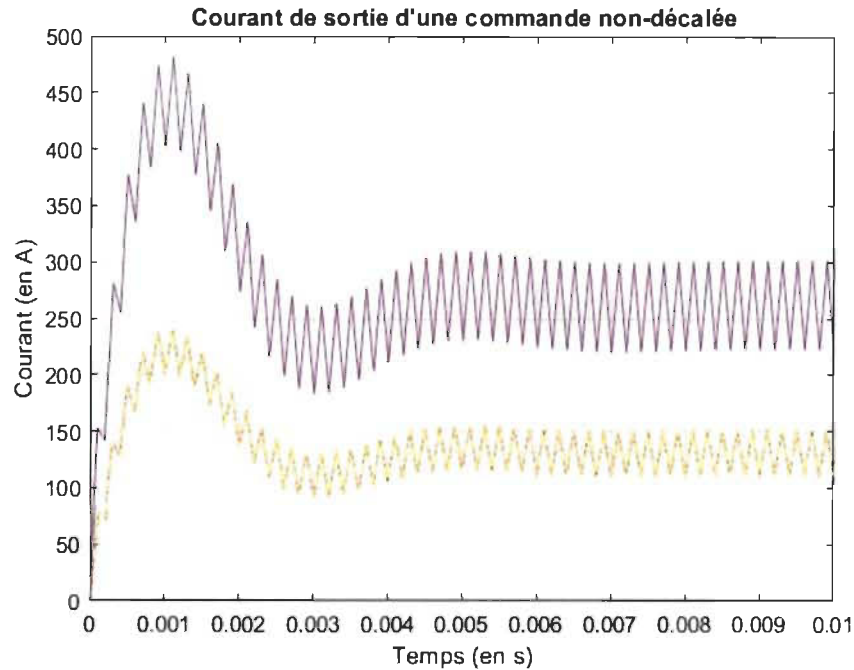


Figure 5-6 Courant L1 et L2 identiques d'une commande non décalée

La courbe du bas montre les courants de L1 et L2 qui sont parfaitement superposés. Une fois additionné, on remarque que la résultante montrée dans la courbe supérieure à un courant d'amplitude égale à deux fois celle du bas et une ondulation deux fois plus élevée.

5.2.2 Commande décalée

La topologie du convertisseur entrelacé repose sur une commande décalée d'une branche à l'autre afin de permettre l'annulation de l'ondulation du courant plutôt que son augmentation telle que vue à la Figure 5-6. Une commande non décalée telle que présentée à la section précédente donnera un courant identique aux deux branches de l'inductance. La sommation des courants qui sera vue par la charge aboutira en un courant dont l'ondulation sera plus élevée.

En décalant la commande reçue par l'interrupteur connecté à l'inductance L2, on obtient deux courants décalés entre eux de 180 degrés. La somme des courants illustrée dans la courbe du haut donne un courant parfaitement continu, ne présentant aucune ondulation dont l'amplitude est égale à deux fois l'amplitude moyenne des courants L1 et L2.

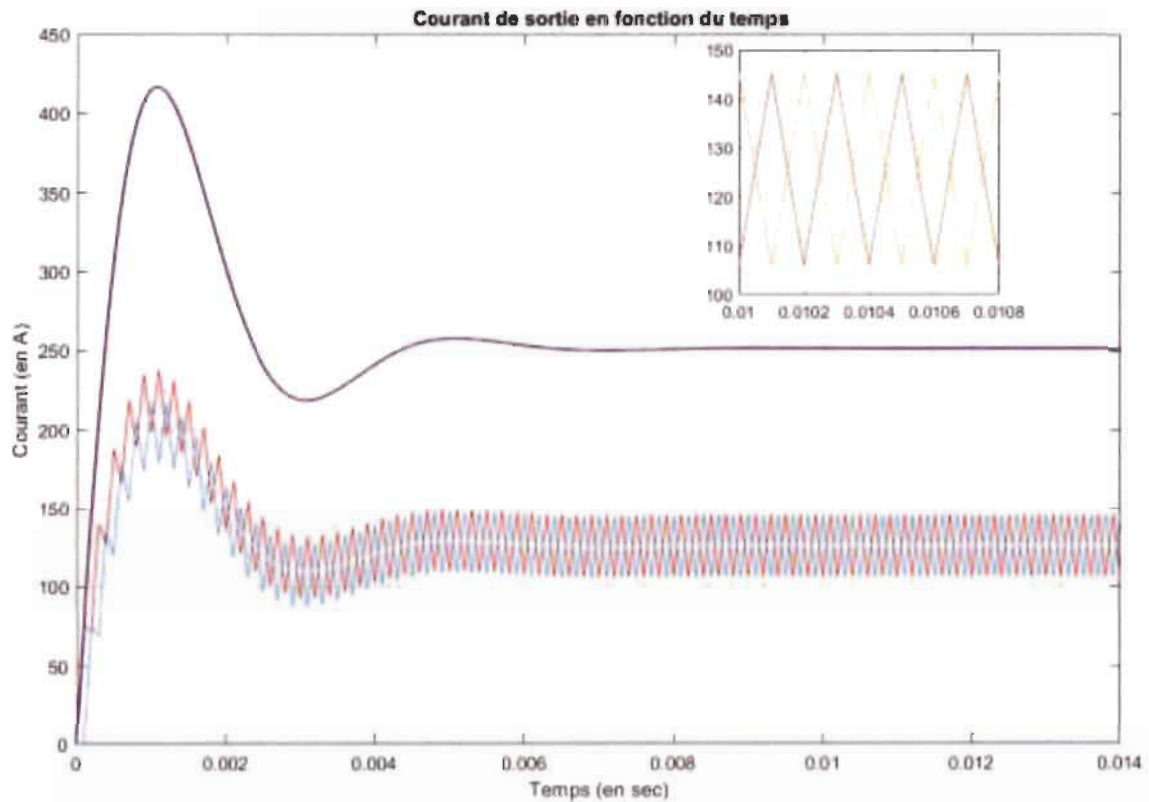


Figure 5-7 Courant dans les branches L1 et L2 et somme des courants en boucle ouverte ($D = 0.5$)

5.3 Simulation du contrôleur de courant

Cette section a pour but d'ajouter un contrôleur de courant PID permettant le contrôle du signal MLI (PWM) généré afin de pouvoir donner un point de consigne au courant comme

requis dans le système en pratique. Le contrôleur permettra aussi une régulation du courant et donnera une meilleure réponse de sortie. La Figure 5-8 montre le schéma du circuit simulé.

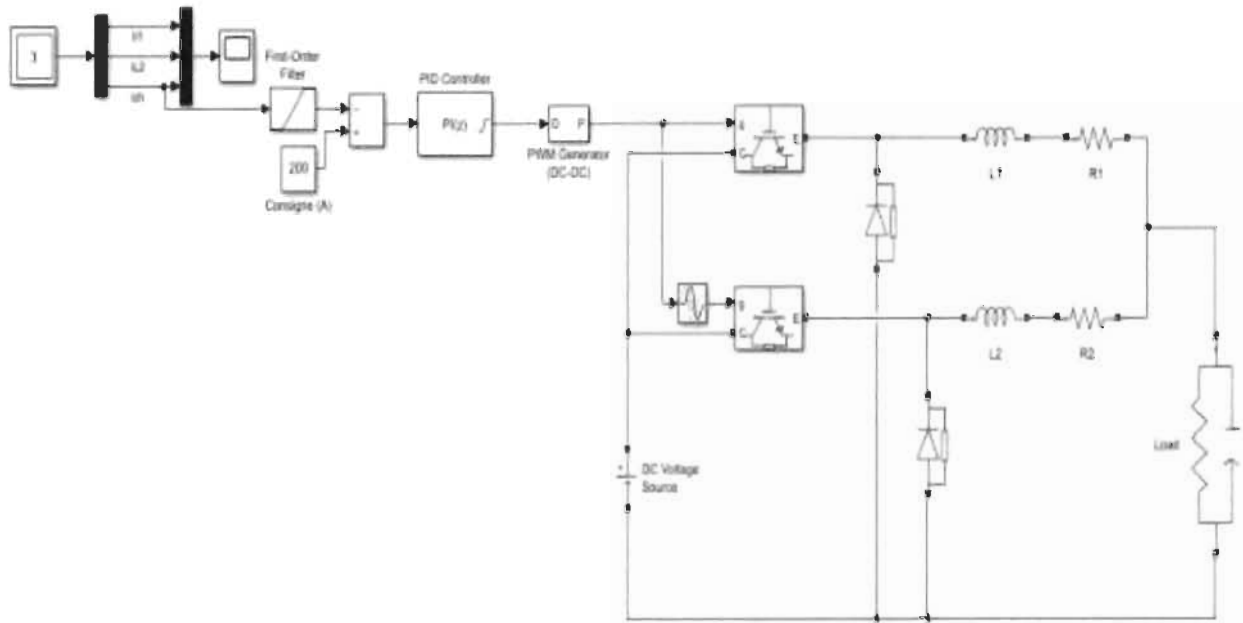


Figure 5-8 Ajout d'un contrôleur PID avec une consigne de 200 A

Le résultat de cette simulation est illustré à la Figure 5-9.

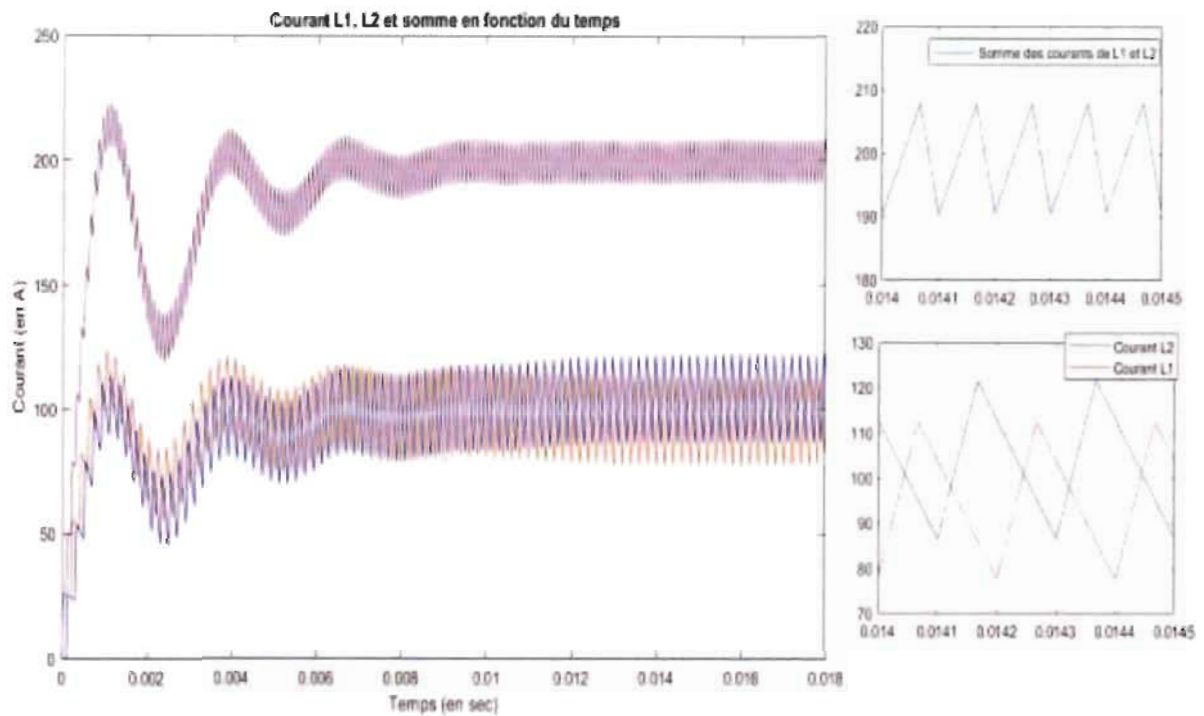


Figure 5-9 Simulation des courants de sortie après l'ajout d'un PID

La simulation précédente a permis d'obtenir une meilleure réponse que le système en boucle ouverte avec moins de dépassement en plus de permettre l'asservissement du courant à une consigne donnée de 200 A. Cependant, on remarque que les deux courants traversant les inductances n'ont pas les mêmes amplitudes minimales et maximales, ce qui entraîne un courant total variant entre 190 et 207 A et augmente l'ondulation du courant de sortie.

Cela est dû au fait que cette commande possède des limitations liées à la modification du rapport cyclique. En effet, comme constaté à la Figure 5-7, un rapport cyclique de 50 % permet d'obtenir un courant triangulaire parfaitement isocèle qui résulte en une annulation parfaite de l'ondulation du courant de sortie. Une fois le contrôleur ajouté, ce dernier régule

le rapport cyclique nécessaire afin d'obtenir la commande désirée et réduit grandement l'ondulation, sans toutefois l'annuler.

L'utilisation d'un seul PID pour le contrôle des deux branches est à l'origine de cette discordance puisque la même correction est appliquée au courant des deux. La correction agit sur le courant total et doit être divisée parfaitement en deux, ce qui complique le contrôle. Pour remédier à ce problème, un contrôleur PID indépendant sera intégré à chacune des phases. La commande de chacune sera ensuite décalée une par rapport à l'autre de 180 degrés. La Figure 5-10 montre le résultat ainsi obtenu.

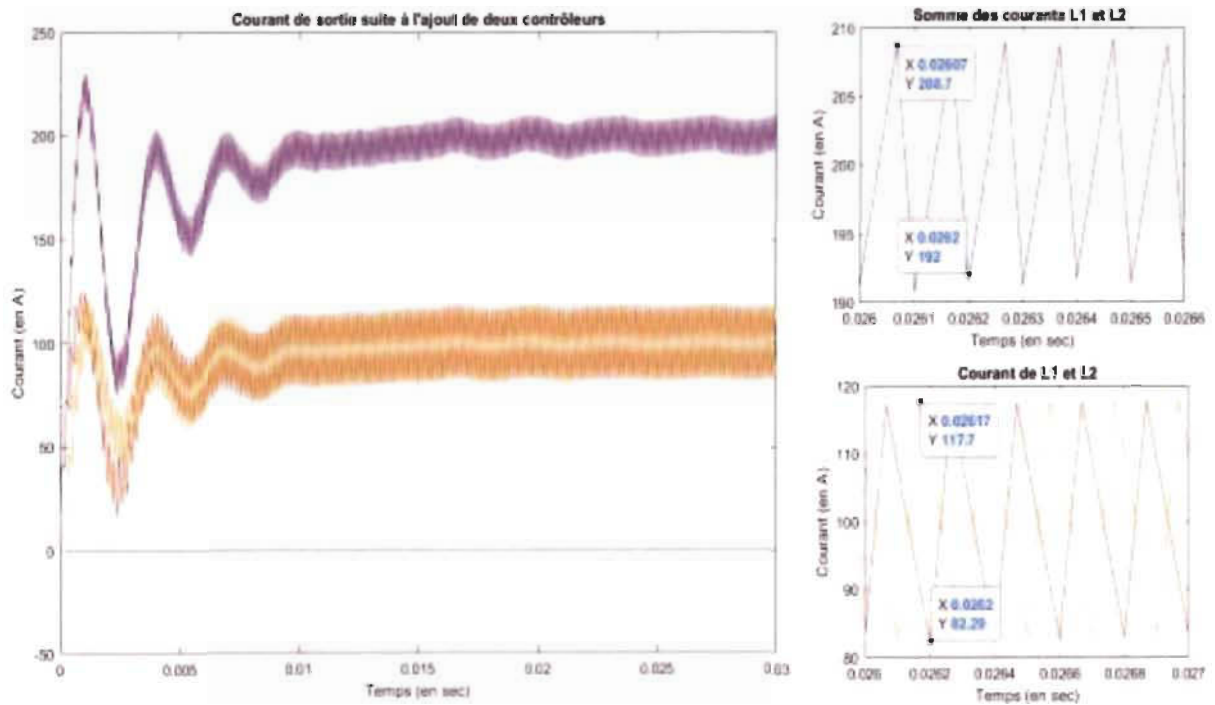


Figure 5-10 Simulation suite à l'ajout de deux contrôleurs

L'utilisation d'un PID distinct pour chacune des deux phases permet d'obtenir une ondulation plus faible du courant total, soit une réduction d'environ 10%, en plus d'un courant symétrique de même valeur sur les deux phases de l'inductance et une erreur plus constante. De plus, il est plus facile pour le contrôleur d'émettre une correction étant donné que chacun possède sa propre référence et sa propre valeur de retour. Il ne doit donc pas se soucier d'émettre une correction équilibrée entre les deux branches. Aussi, cette méthode permet une meilleure utilisation des interrupteurs par la répartition du courant du circuit, ce qui devrait améliorer la fiabilité du circuit puisque la déviation des caractéristiques des composants électroniques des deux branches du circuit sera équivalente.

5.3.1 Contrôleur Bang-Bang ou à hystérésis

La prochaine étape de la simulation consistera à ajouter le contrôleur bang-bang en parallèle au contrôleur PID selon la stratégie discutée à la section 4.1.3. Ce contrôleur servira pour les perturbations importantes auxquelles est soumis un système aussi instable que des torches à plasma. Il sera également utile lors des démarrages pour guider le courant dans une plage de contrôle raisonnable et contrôlable par le PID.

5.3.1.1 Simulation du comportement du contrôleur

Le modèle de la Figure 5-11 représente une modélisation du contrôleur bang-bang. Ce dernier reçoit le courant de sortie identifié comme "I" et effectue un choix qui sera envoyé dans la bascule R-S. La valeur nommée "delta" qui représente la fenêtre de variation choisie est de 20 A, soit 10% de la valeur maximale. Lorsque le courant sera inférieur à la valeur de consigne 200 A moins 20 A, la valeur Q de la bascule sera 1, ce qui donnera un 0 au sélectionneur et la sortie Vs sera de 0 V. Ce contrôle est appliqué à la tension de source (Vs)

qui alternera entre une valeur de 0 à 200 V, entraînant ainsi une augmentation ou une diminution du courant selon la valeur reçue à l'entrée.

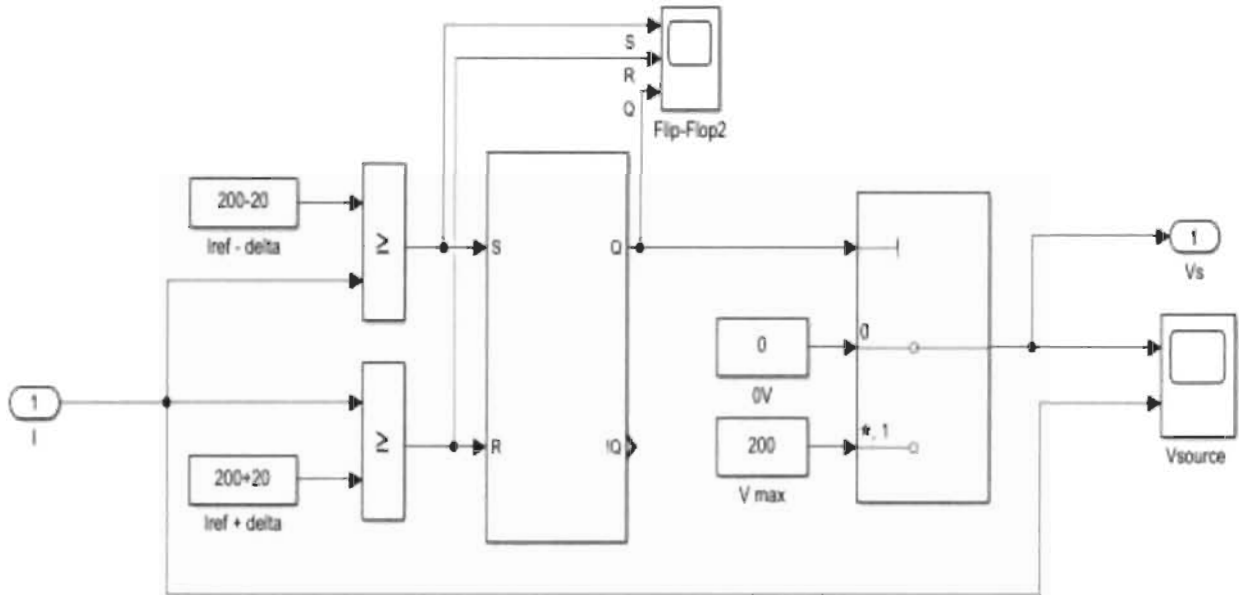


Figure 5-11 Modèle du contrôleur à hystérésis

La Figure 5-12 illustre le résultat de la simulation. Il est possible de remarquer dans la figure de droite intitulée "courant au démarrage" comment le courant est limité par la tension portée à zéro lors du dépassement de la valeur delta.

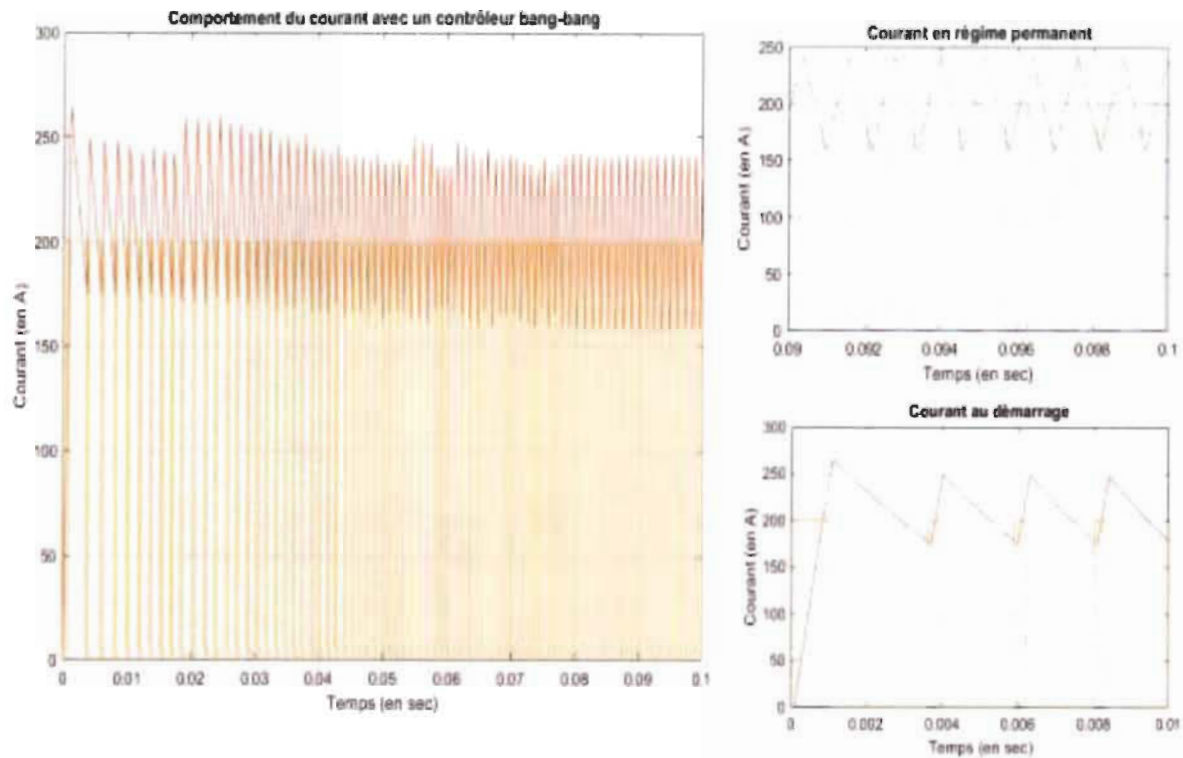


Figure 5-12 Mesure du courant et de la tension avec l'ajout d'un contrôleur Bang-Bang

5.3.1.2 Intégration du contrôleur dans le schéma du convertisseur entrelacé

La section suivante a pour but d'intégrer le contrôleur à la simulation du convertisseur entrelacé et d'observer son effet au démarrage ainsi qu'à la suite d'une perturbation, soit les moments où le contrôleur bang-bang devrait intervenir au cours de l'opération des torches à plasma. La Figure 5-13 montre le modèle de la simulation des contrôleurs parallèle. Le choix du contrôleur est établi selon la valeur de l'erreur obtenue par la comparaison entre le courant de retour de sortie de l'inductance et la valeur du courant demandée. La valeur choisie pour la simulation est de 20 A. Autrement dit, une erreur inférieure à 20 A activera le contrôleur PID, alors qu'une erreur supérieure à 20 A utilisera la sortie du contrôleur Bang-Bang.

Contrôleurs

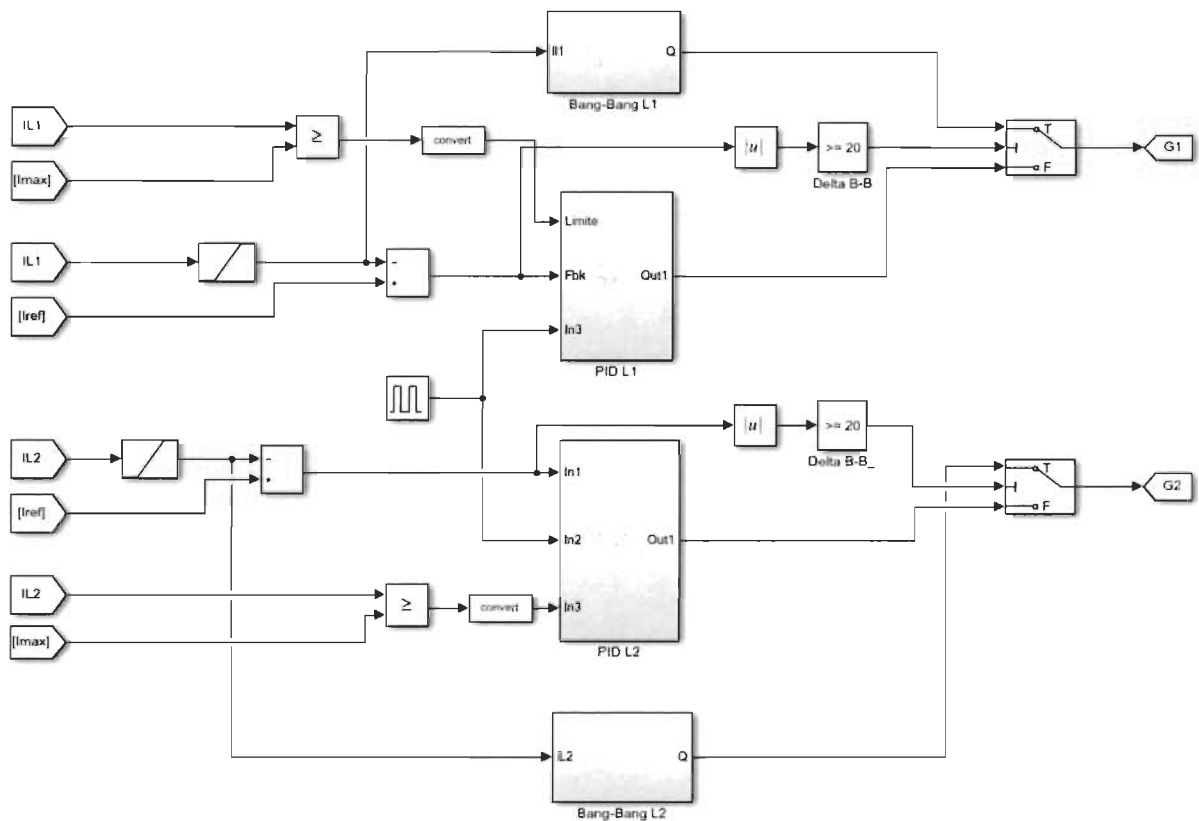


Figure 5-13 Simulation des contrôleurs parallèles

La Figure 5-14 montre la deuxième partie du circuit simulé avec l'ajout d'un interrupteur permettant de modifier la valeur de la charge durant l'opération et d'ainsi créer une perturbation.

Convertisseur DC-DC

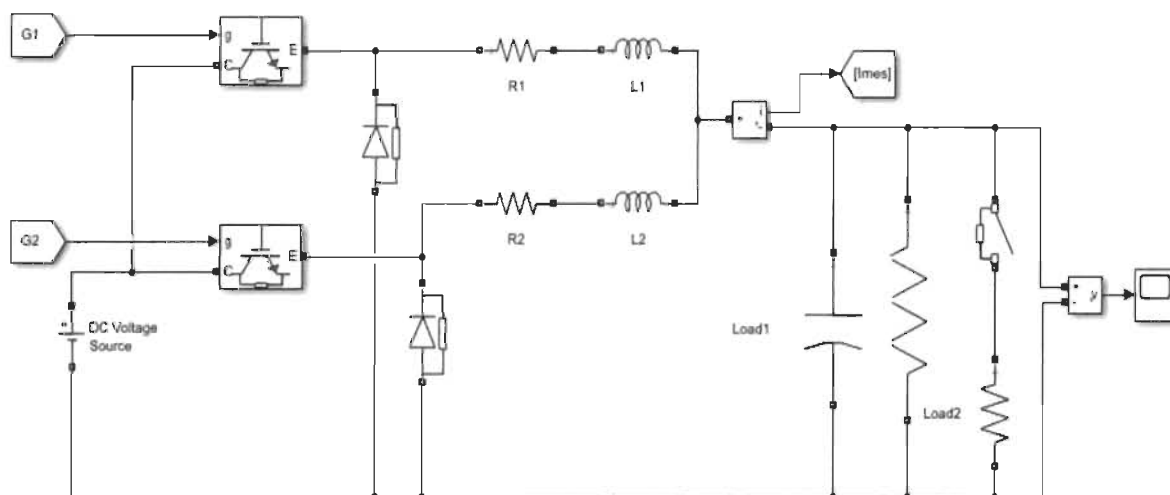


Figure 5-14 Simulation du convertisseur DC-DC avec modification de la charge

La Figure 5-15 met en évidence le comportement du courant au démarrage dans un premier temps, et à la suite d'une perturbation. On constate la réaction distincte de chacun des deux contrôleurs parallèles. Le contrôleur bang-bang agit au démarrage entre 0 et 0.01 seconde pour limiter le courant à 300 A ainsi qu'entre 0.03 et 0.045 seconde suite à une perturbation appliquée qui est, dans ce cas, une modification de la charge appliquée à 0.04 seconde. Ce type de perturbation se produit régulièrement lorsque le débit du gaz plasmagène est modifié dans le procédé. À la suite de ces deux événements, on remarque que le contrôleur PID reprend rapidement le contrôle et corrige l'erreur afin de maintenir le courant autour de la consigne de 250 A.

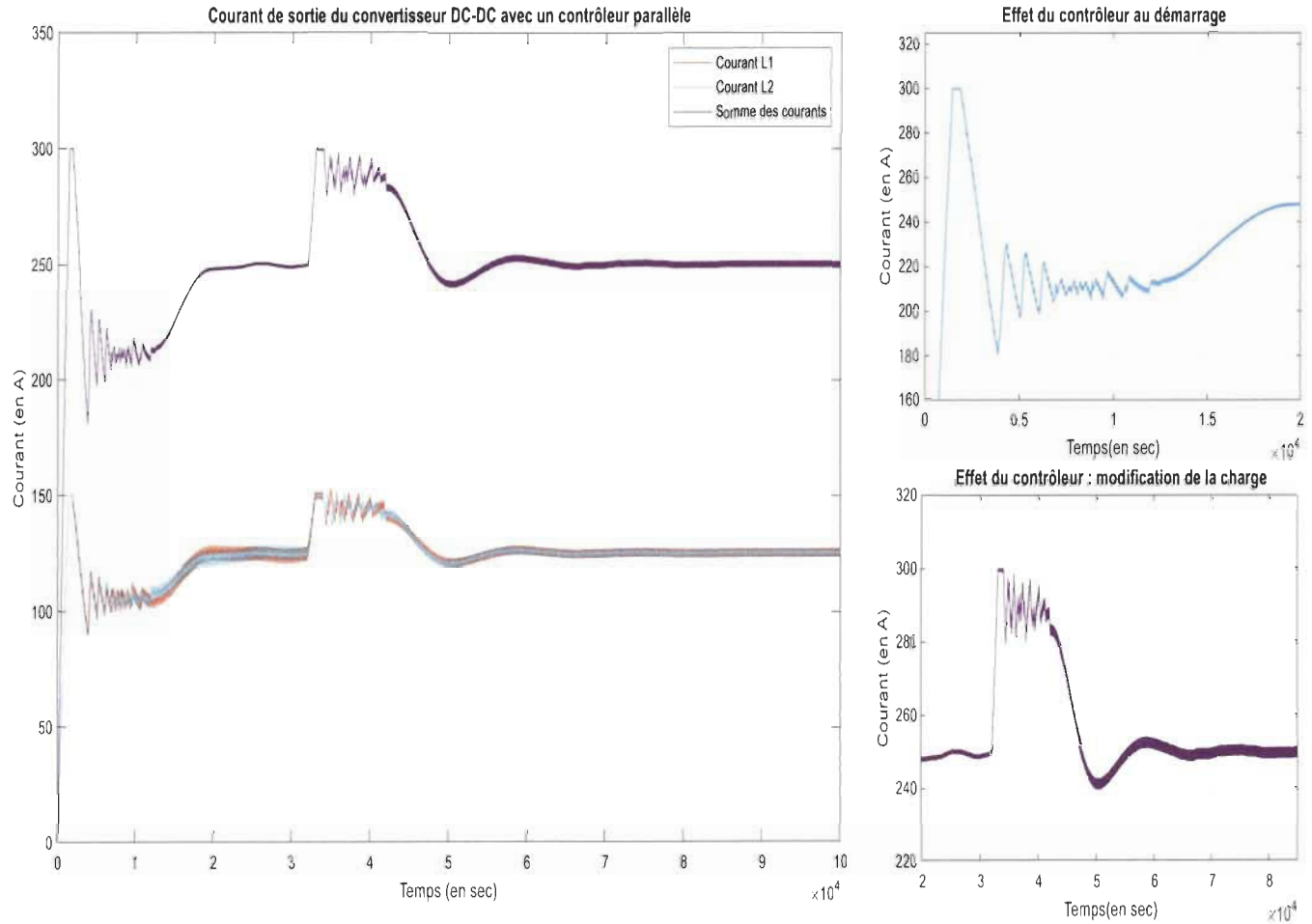


Figure 5-15 Comportement des contrôleurs au démarrage et à la suite d'une perturbation

5.3.2 Filtrage de la lecture du courant

Afin d'obtenir un résultat du PID non bruité, il est primordial de filtrer la lecture de courant de retour qui sera comparée à la référence. La Figure 5-17 montre la comparaison de la lecture du courant avant et après l'ajout d'un filtre. Le filtre utilisé est de premier ordre de type passe-bas.

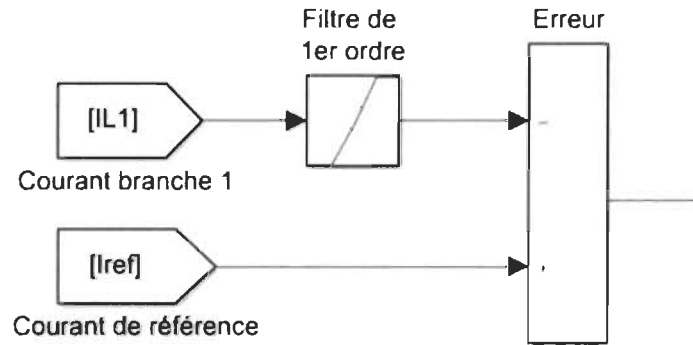


Figure 5-16 Filtre passe-bas de la lecture de courant

La fonction de transfert de ce filtre est donnée par l'équation ci-dessous et la valeur de la constante de temps s est la suivante : $s = 0.6e-3$

$$H(s) = \frac{1}{1 + T \cdot s}$$

La fréquence de coupure de ce filtre peut être déterminée par l'équation suivante :

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.6e-3} = 1.67 \text{ kHz}$$

D'après les essais en simulation, cette valeur a permis d'obtenir un bon compromis entre le déphasage en régime transitoire et l'ondulation en régime permanent. La Figure 5-17 montre le résultat du filtre en comparant le signal avant et après du courant de sortie. On remarque les délais néfastes introduits par le filtre qui contribuera à réduire les marges de stabilité.

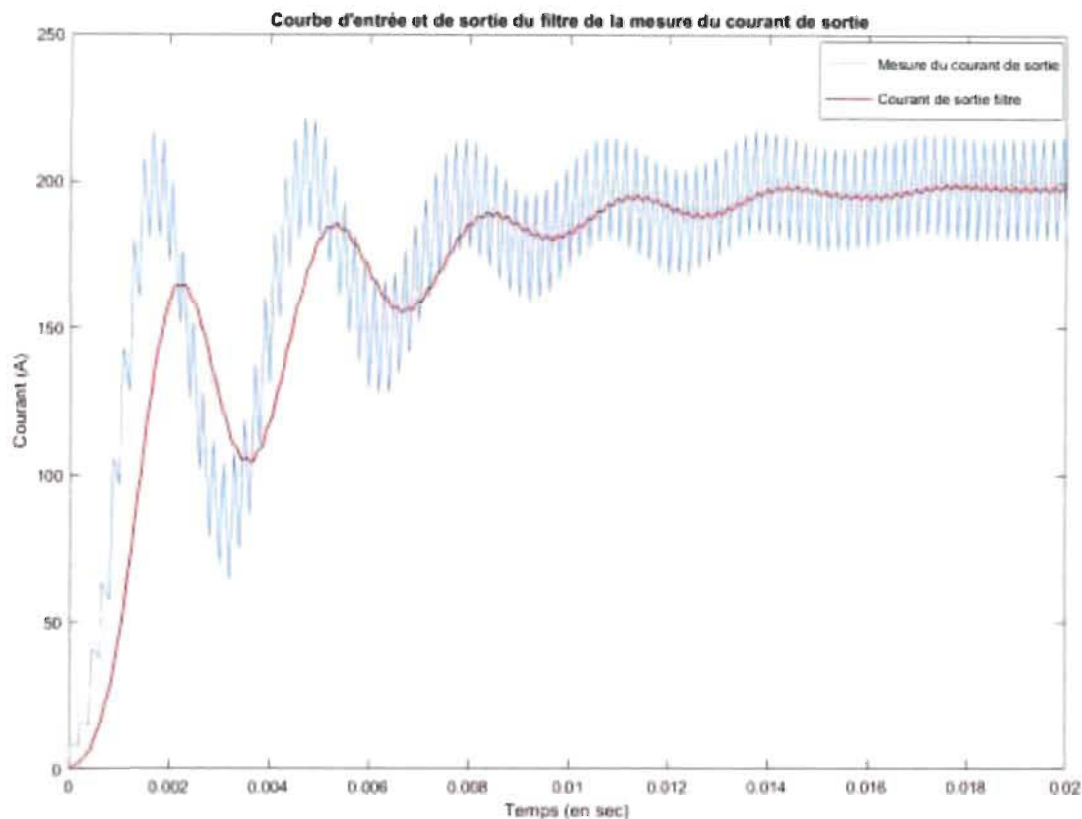


Figure 5-17 Comparaison de la lecture du courant de sortie avec et sans filtrage

5.3.3 Rampe d'accélération

Comme tout contrôleur PID, le démarrage initial entraîne un dépassement ainsi que quelques oscillations. Dans les simulations précédentes, le temps de stabilisation est de l'ordre de 0.01 seconde ce qui permet à la consigne d'être atteinte rapidement. Cependant, ce temps peut être plus long en pratique et le dépassement plus élevé en fonction des différentes conditions externes telles que l'impédance de la ligne électrique. De plus, un dépassement trop important pourrait causer l'activation des protections et par le fait même, empêcher un démarrage réussi de la torche. Pour cette raison, il serait préférable d'opter pour

un démarrage progressif ou « soft start » qui consiste à concevoir une rampe d'accélération qui fera augmenter graduellement la consigne du courant désiré.

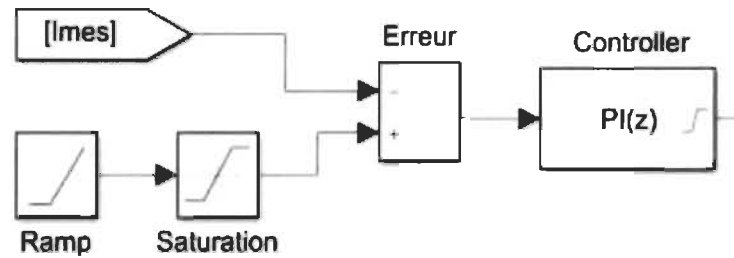


Figure 5-18 Simulation de la rampe de la consigne

La durée de la rampe choisie est de 0.01ms. Ainsi, pour une consigne de 400A la pente sera de :

$$Pente = \frac{400}{0.001} = 400\,000 \quad (5-4)$$

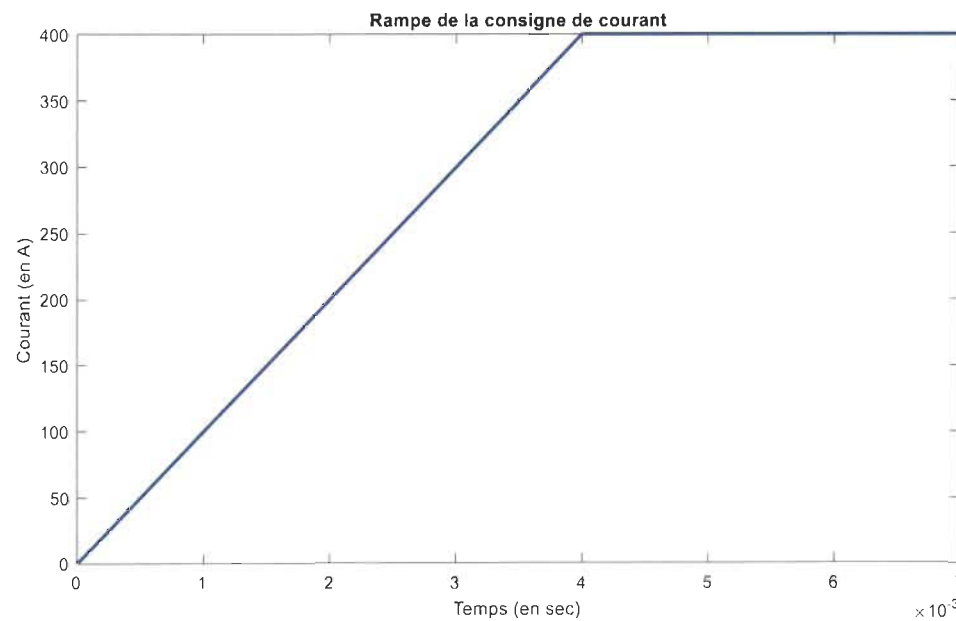


Figure 5-19 Comportement de la rampe de la consigne du convertisseur

De cette façon, la consigne passera de 0 à 400 A en 4 ms causant ainsi une augmentation progressive du courant de sortie tel que présenté à la Figure 5-19.

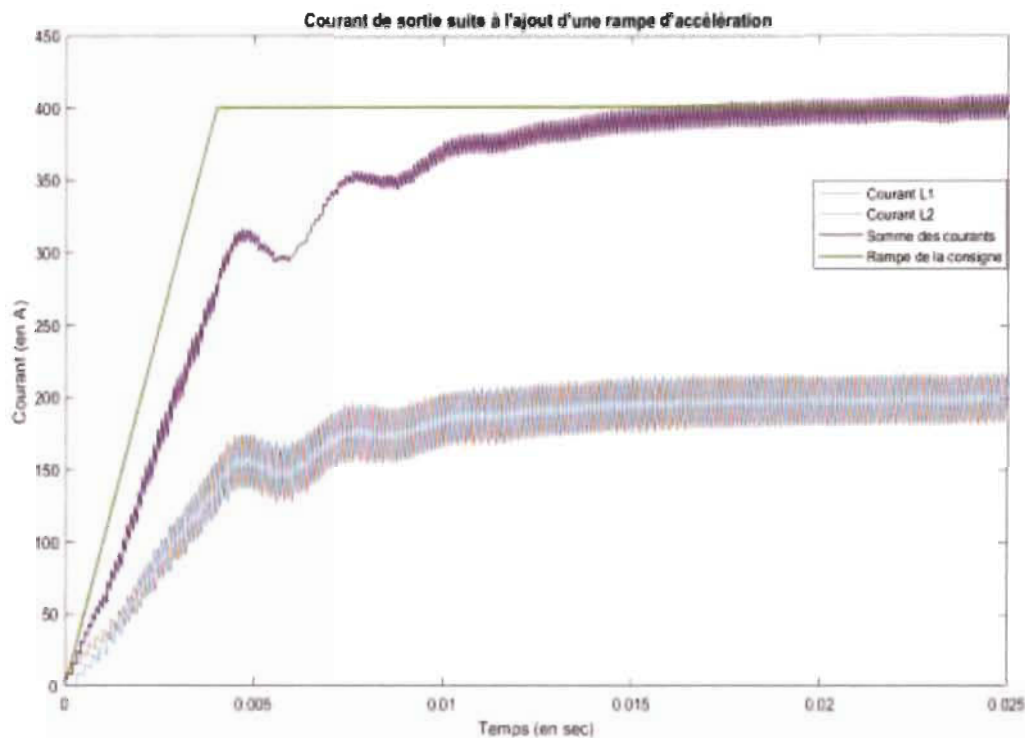


Figure 5-20 Courants de sortie suite à l'ajout d'une rampe progressive de la consigne

5.4 Protection des équipements électriques

Tel que mentionné dans le chapitre quatre, tout système électrique et industriel doit obligatoirement avoir des protections en cas de conditions incontrôlables afin d'assurer la sécurité des utilisateurs et des opérateurs en plus de prolonger la durée de vie des équipements en évitant des bris non désirables. Cette section traitera donc de deux protections qui seront implémentées.

5.4.1 Condition nécessitant l'arrêt du système

La première protection abordée sera celle où un arrêt du système est inévitable. Il peut arriver que des conditions extérieures, telles qu'un court-circuit à la torche, entraînent l'augmentation rapide du courant de sortie. Dans ce cas, un arrêt imminent devrait se produire afin d'éviter le bris d'équipement tel que les IGBT qui possèdent une limite de courant bien définie sur une période de temps limitée. Le montage de la Figure 5-21 sera utilisé pour la simulation des protections proposées.

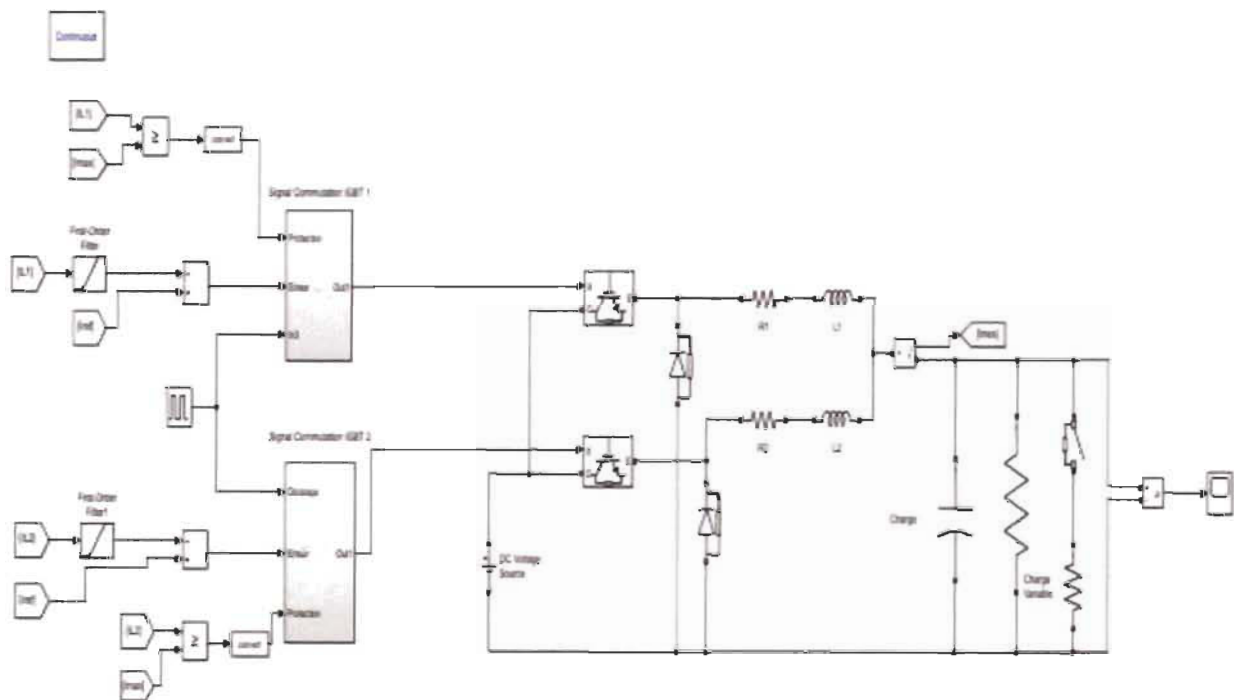


Figure 5-21 Montage du convertisseur incluant les protections de surintensité

La Figure 5-22 représente la logique nécessaire pour définir la limite de courant permise de ce circuit. Cette dernière sera modifiable en pratique et pourra être ajustée en fonction du dimensionnement du produit, des composants utilisés et de la torche à plasma.

Consigne de Courant

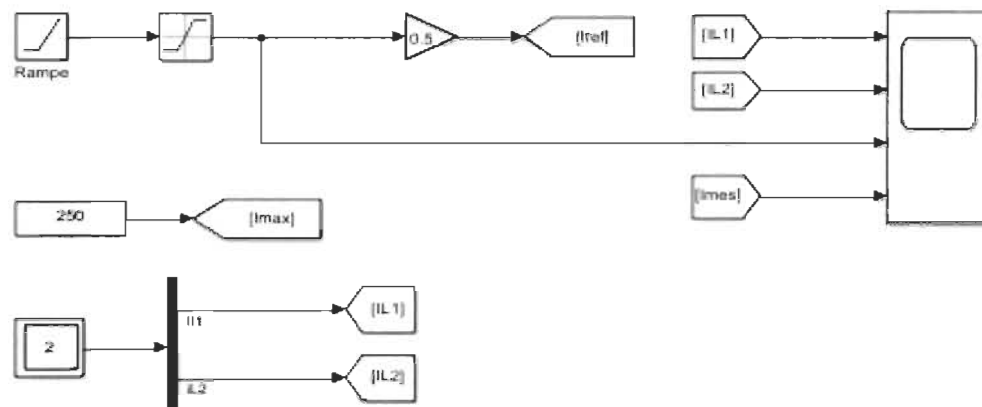


Figure 5-22 Définition de la limite de courant

La Figure 5-23 illustre le bloc du contrôleur PID et la génération du signal de modulation (MLI).

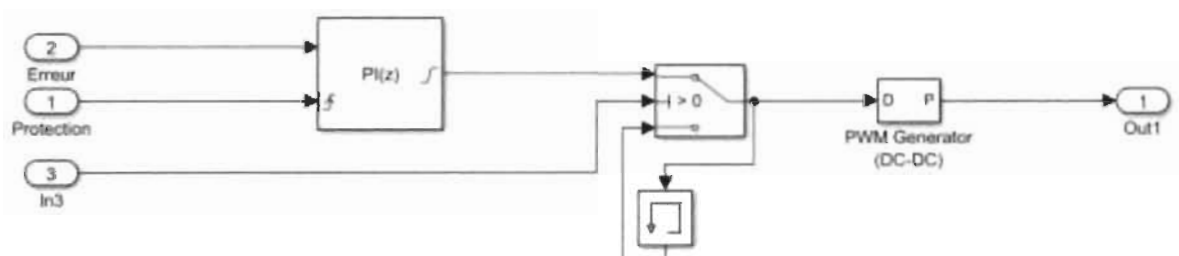


Figure 5-23 Contrôleur de courant PID et génération du signal MLI

La Figure 5-24 montre un arrêt nécessaire causé par l'augmentation rapide du courant qui ne pourrait pas être facilement contrôlée et maîtrisée par la protection qui sera mentionnée

dans la section suivante. La limite du courant maximal a été mise à 600 A et représente la limite pouvant être supportée par les équipements, dont les interrupteurs de commutation.

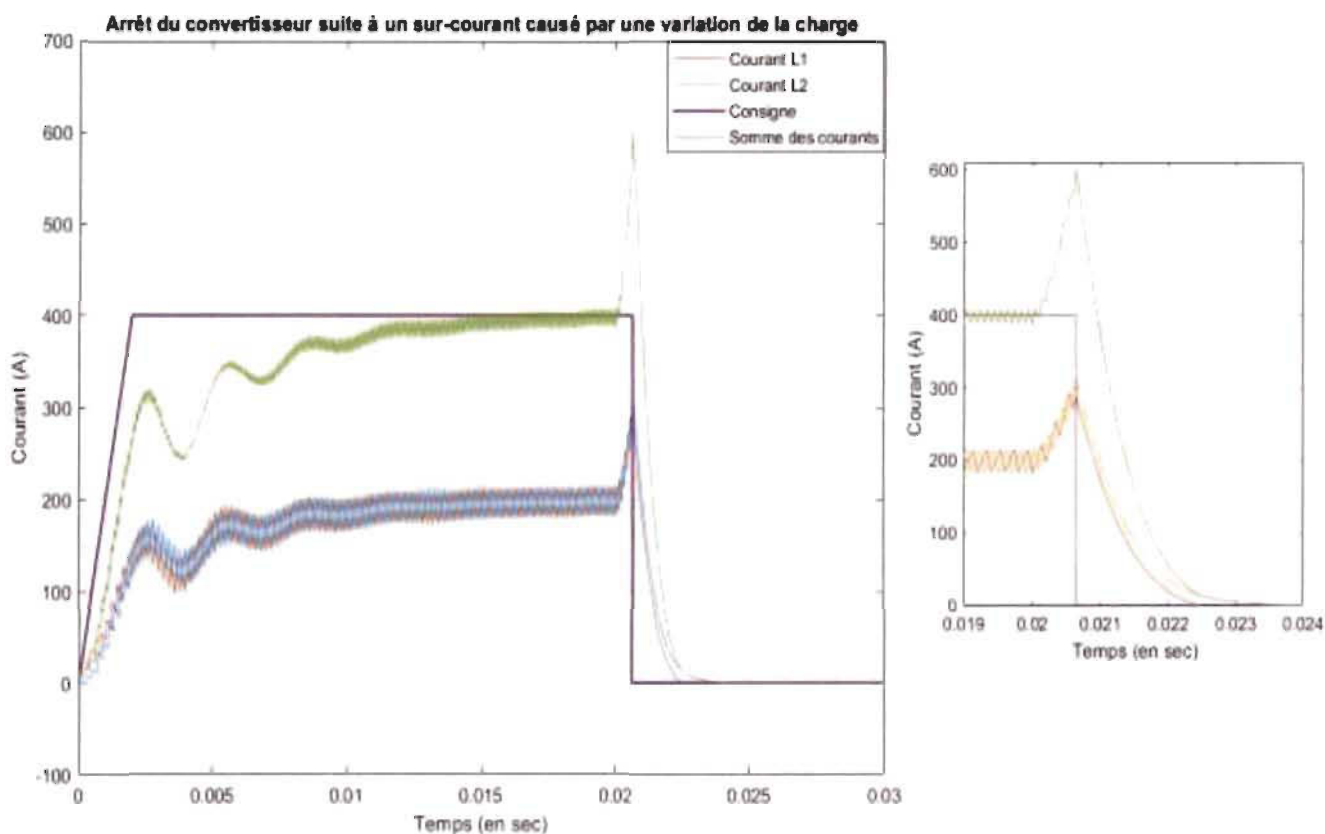


Figure 5-24 Arrêt du convertisseur suite à un changement brusque de charge

Cette augmentation brusque du courant a été simulée par la variation brusque de l'impédance de la charge qui peut se produire en pratique suite à la variation du débit du gaz, à un changement le procédé ou encore, à un court-circuit dans la torche suite à un bris mécanique. Cette condition est la plus commune dans un système réel et peut se produire durant le cycle d'opération des torches à plasma.

En pratique, le courant lu à la sortie du convertisseur présente un délai. De plus, l'arrêt requiert un délai supplémentaire correspondant à la prise de décision et à l'émission d'une réponse par le processeur. Ce temps de délai est estimé dans le système testé en pratique à environ 300 us. Une deuxième simulation incluant ce délai a été réalisée et est montrée à la Figure 5-25.

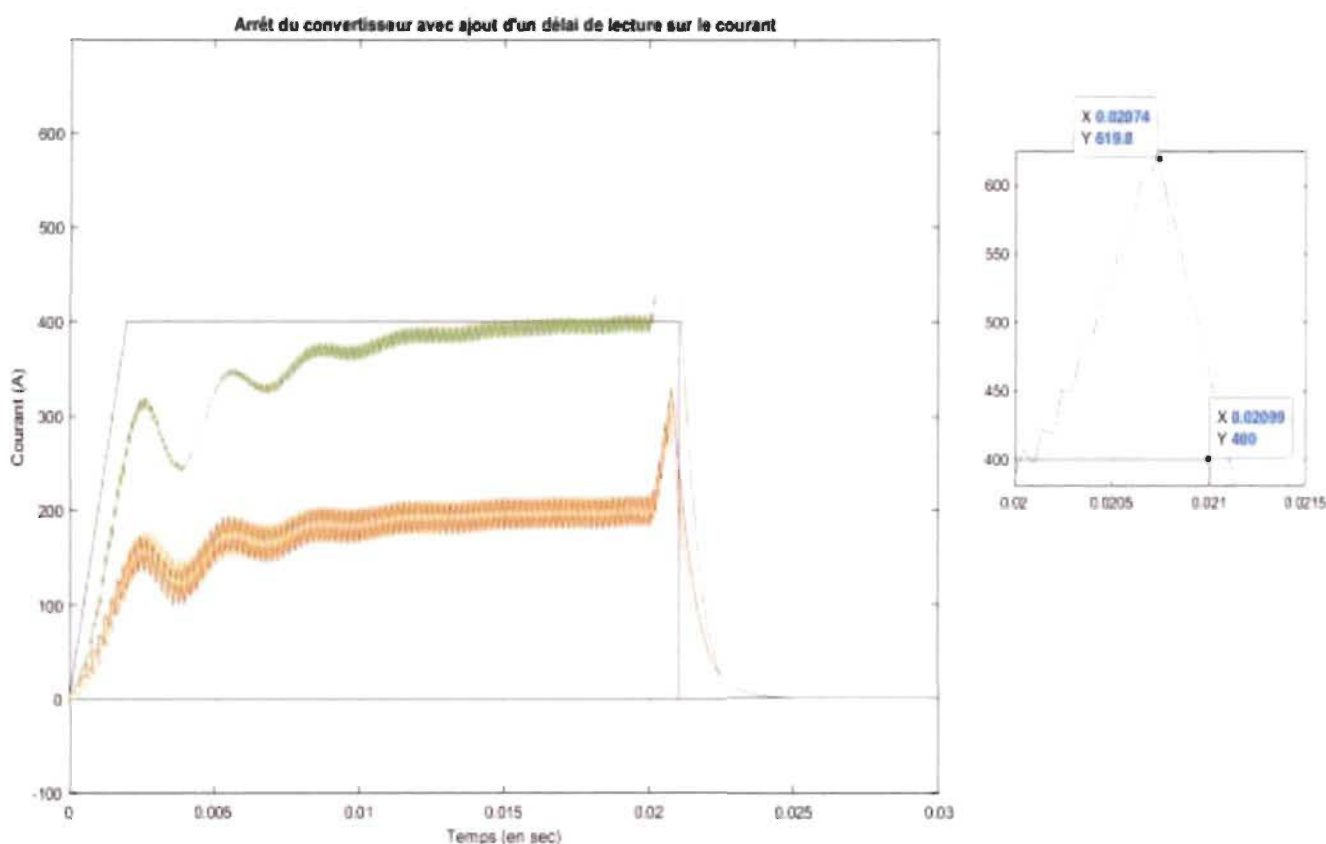


Figure 5-25 Surintensité provoquée par un changement brusque de la charge (ajout d'un délai sur la lecture de 300 us)

Dans la figure précédente, on remarque que le délai a permis au courant de sortie de dépasser la limite imposée de 600 A jusqu'à l'atteinte de 620 A. Il est donc primordial de tenir compte de cette différence au moment de la conception afin de prévoir une marge sur la limite plus élevée que la tolérance réelle des équipements électroniques.

5.4.2 Conditions ne nécessitant pas l'arrêt immédiat

La deuxième protection consiste à limiter le courant de sortie lorsque ce dernier se met à augmenter dans un temps raisonnable à une valeur n'ayant pas provoqué le déclenchement de la protection mentionnée à la section précédente. Le principe consiste à limiter la commutation des interrupteurs dès que le courant dépasse la limite fixée. Cette protection est surtout utile pour éviter l'arrêt complet lors d'événements transitoires. Les transistors seront bloqués pendant quelques cycles permettant ainsi au courant de redescendre tranquillement tout en l'empêchant d'augmenter à une très haute valeur.

La Figure 5-26 montre un exemple de ce phénomène. On remarque qu'à 0.015 seconde, une consigne de 600A est appliquée au contrôleur. Ce dernier limite la montée du courant à la valeur fixée soit 500A. Les oscillations à haute fréquence sont dues à l'activation et la réactivation rapide des transistors lorsque ceux-ci sont en dessous de la limite. Après la perturbation appliquée, le courant recommence graduellement à suivre la consigne demandée selon la plage d'opération prévue.

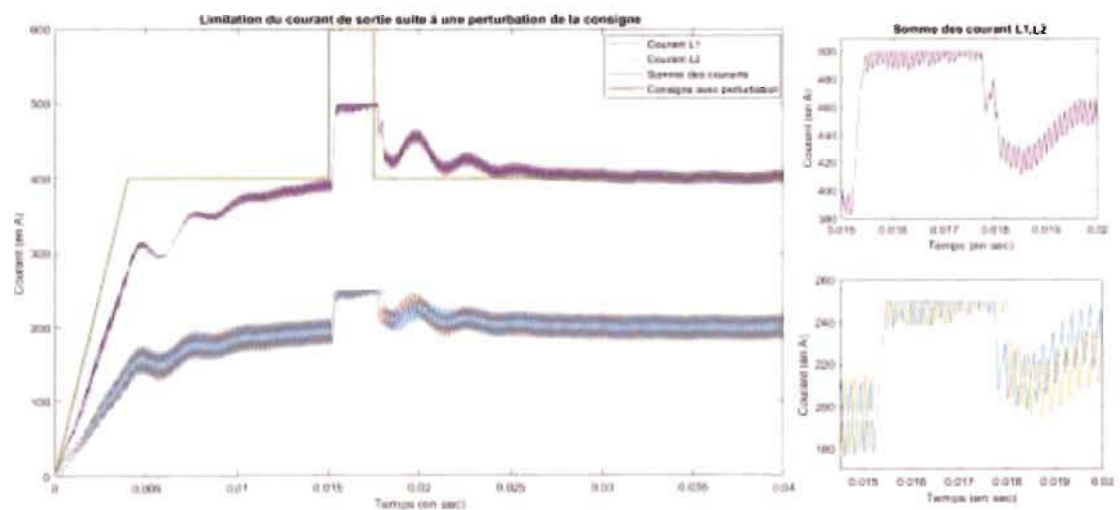


Figure 5-26 Simulation d'une variation de la consigne

5.5 Conclusion

Le cinquième chapitre a permis de visualiser et de confirmer les principes théoriques énoncés dans les sections précédentes. Tout d'abord, il a été possible d'observer le comportement de la torche à plasma et d'ainsi voir la nécessité d'adopter un contrôleur de courant afin de réguler les variations de cette charge non linéaire. Ensuite, il a été constaté les avantages de la commande décalée sur l'ondulation du courant.

Les deux contrôleurs choisis et implémentés en parallèle se complètent afin de donner un contrôle total et optimal au convertisseur DC-DC. Agissant à des moments et dans des conditions différentes, ils permettront d'assurer la stabilité de la charge à tous les cycles d'opération.

Quelques mécanismes de protection ont également été présentés et agiront lorsque les changements d'opération seront trop brusques pour être maîtrisés par les contrôleurs. Des arrêts brusques seront parfois nécessaires pour protéger les équipements et les opérateurs. À ce moment, une intervention de maintenance devra être effectuée afin de vérifier qu'il est sécuritaire et désirable de redémarrer le système de production.

Il est maintenant temps de valider ces principes théoriques sur un système pratique. Le chapitre suivant traitera des tests effectués dans le laboratoire de recherche et développement ainsi que ceux réalisés sur un réacteur de torche à plasma.

Chapitre 6 - Validation expérimentale

Le sixième chapitre de ce travail est consacré à la validation des principes théoriques des chapitres précédents. La validation expérimentale a été divisée en plusieurs étapes qui sont la programmation, le développement d'un banc d'essai dans le laboratoire de recherche et développement, les tests expérimentaux et finalement, les tests et expérimentations sur un système réel de torche à plasma.

La programmation du système a été abordée dans le chapitre quatre et consistait, avant tout, à reproduire les blocs simulés à l'aide du logiciel SimulinkTM dans une configuration optimisée et acceptée par le compilateur. Les sous-sections suivantes présentent les étapes subséquentes.

6.1 Essai en laboratoire (Département R&D Suez WTS)

La première étape de validation expérimentale était la mise au point d'un banc d'essai dans le laboratoire de recherche et développement de Suez WTS avec l'aide de l'équipe de R&D et des techniciens de production. Les tests devaient être réalisés avec les ressources disponibles dans la mesure du possible tout en permettant de reproduire le comportement d'un système réel. La Figure 6-1 montre une photo du banc de test final.



Figure 6-1 Banc de test R&D

Les boîtes métalliques contiennent les I-StacksTM développés et appartenant à Suez WTS. Ces modules refroidis à l'air incluent le redresseur ainsi que le convertisseur entrelacé et peuvent être utilisés en tant que source de puissance ou de charge selon leur configuration. Cette fonctionnalité développée par Suez WTS permet la recirculation de la puissance et minimisera le matériel nécessaire pour un banc d'essai puisque le premier agira comme la source, et le deuxième comme la charge simulant le comportement d'une torche à plasma. Chaque système possède son propre transformateur d'alimentation de 220 V et est relié à un montage d'inductance séparée sur deux branches, permettant le test du convertisseur entrelacé. La Figure 6-2 montre le montage d'inductance de puissance installée au-dessus de chacun des I-StacksTM ainsi que les condensateurs connectés entre la source et la charge conformément au schéma électrique présenté dans le chapitre cinq.

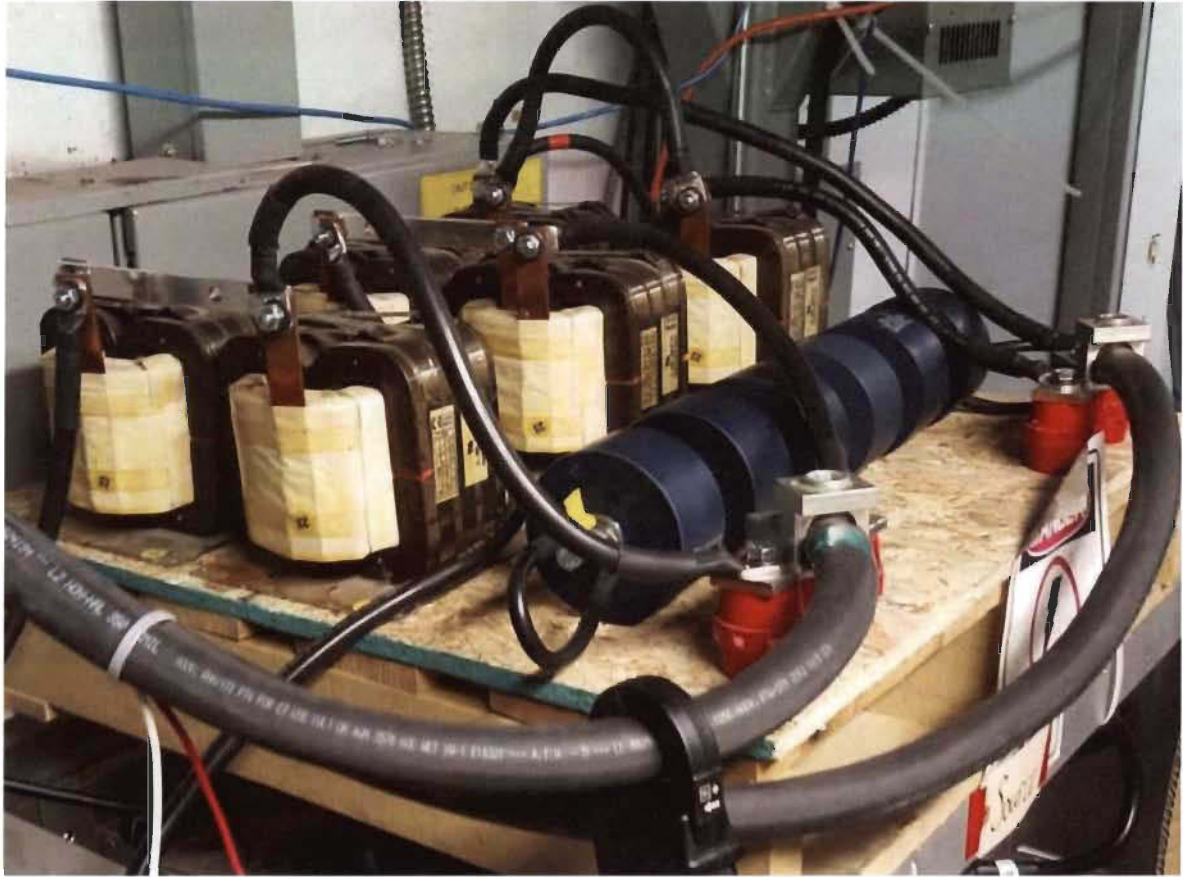


Figure 6-2 Charge d'inductance du convertisseur entrelacé

L'objectif de ce premier test était de valider le fonctionnement du convertisseur entrelacé en adaptant le circuit déjà existant de l'I-Stack™ en utilisant les cartes électroniques disponibles. Pour y arriver, de légères modifications sur l'équipement ont été nécessaires telles que l'ajout d'un capteur de courant supplémentaire à la sortie et l'adaptation des signaux de commutation des transistors.

La majorité des changements permettant l'utilisation de ces modules dans cette application ont été réalisés par programmation. Le processeur utilisé possède deux logiciels distincts développés par Suez WTS. Le rôle du premier est l'interfaçage avec les signaux de

la carte électronique tel que les lectures de courant analogique et ne sera pas abordé dans ce travail. Le deuxième logiciel contient les fonctionnalités programmées à l'aide de Matlab/Simulink™.

Ce langage de programmation est graphique et semblable au diagramme bloc et Grafcet communément utilisés pour les automates programmables industriels (API). Il est donc très accessible aux ingénieurs et scientifiques contrairement aux langages C, C++ plus populaires dans les systèmes embarqués, mais qui requièrent des connaissances de programmation spécifiques. Le choix de ce type de langage repose donc sur sa simplicité et son accessibilité qui lui procurent l'avantage de pouvoir facilement être maintenu et modifié par un large éventail de professionnels. La section suivante détaillera l'adaptation et de l'intégration de certains aspects du code Simulink.

6.2 Intégration et programmation des blocs de logique

Tel que mentionné dans le chapitre cinq, la programmation doit être réalisée de manière optimisée avant d'être intégrée dans le processeur afin de limiter le nombre de tâches à exécuter, et par le fait même, réduire le temps d'exécution requis. Les figures présentées ci-dessous montrent un exemple des blocs de logique utilisés pour implémenter les contrôleurs parallèles.

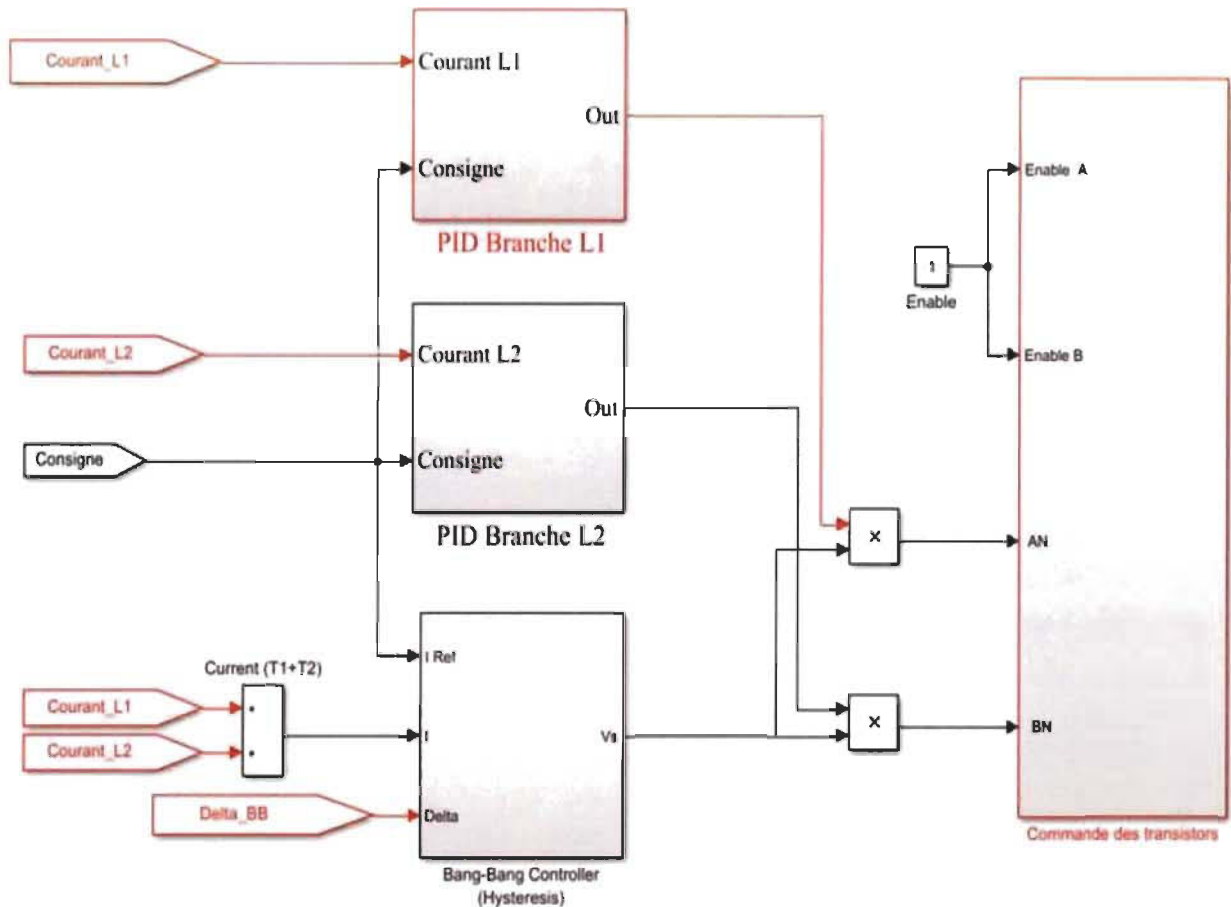


Figure 6-3 Intégration des contrôleurs parallèles

Les courants L1 et L2 proviennent des signaux d'acquisition analogique des capteurs de courant installés sur chacune des branches, tandis que la consigne provient d'une entrée externe ajustable à l'aide d'un paramètre disponible sur l'interface web qui sera abordé dans la section suivante. Le bloc de droite représente l'ensemble des commandes envoyées aux transistors pour la génération des signaux PWM du convertisseur. Les signaux sont par la suite connectés aux sorties analogiques pour la transmission aux modules d'IGBT de la carte électronique.

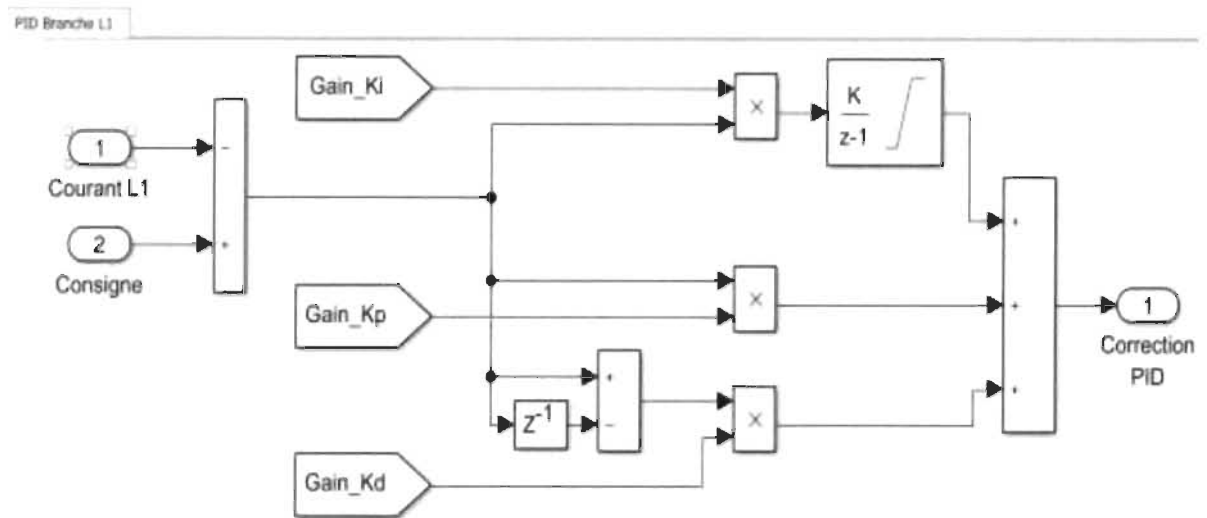


Figure 6-4 PID Branche L1 et L2

La Figure 6-4 montre les deux contrôleurs PID, dont les trois gains seront également ajustables à l'aide de paramètres de la page web intégrée disponible dans les équipements de Suez WTS.

Finalement, le bloc de la Figure 6-5 montre le contrôleur parallèle tel qu'il a été simulé précédemment. L'entrée nommée "delta" représente la fenêtre d'hystérésis et sera ajustée au démarrage du système réel afin d'ajuster la réponse de sortie.

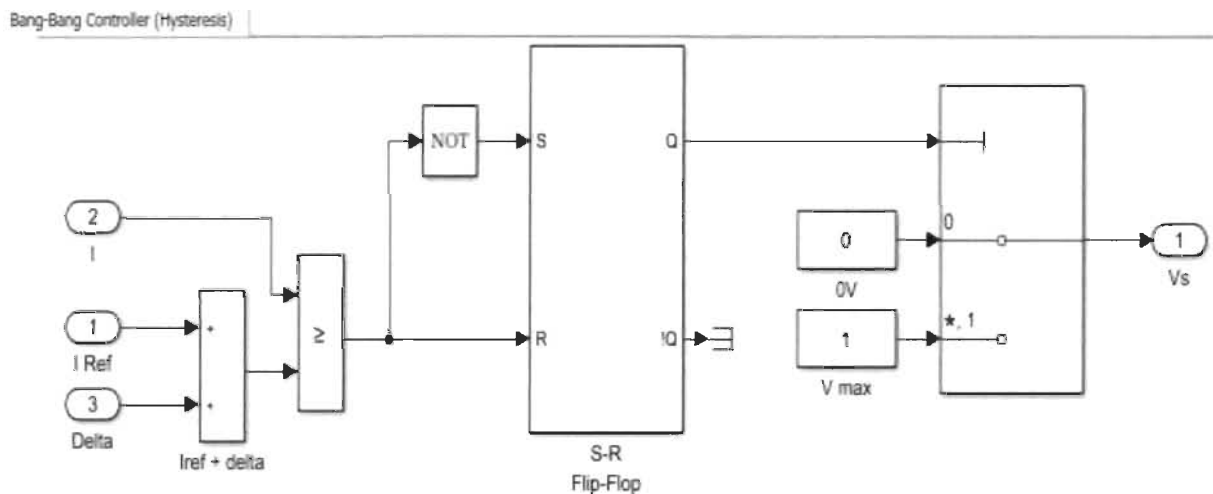


Figure 6-5 Contrôleur Bang-Bang

6.3 Page web intégrée

Les modules I-StackTM développés par Suez WTS comportent, dans une des cartes processeur, un serveur web aux multiples fonctionnalités. Sa fonction principale est de permettre le contrôle de l'opération et de donner différentes informations du système tel que son état. Il permet aussi d'établir un diagnostic avancé des erreurs d'opération et des conditions qui provoquent son arrêt. Ces menus sont dotés, dans un premier temps, de variables qui rendent accessible la lecture des valeurs de tension, de courant, de puissance, etc.

En second lieu, ils contiennent des paramètres qui sont, entre autres, utilisés pour l'ajustement des gains des contrôleurs, de la consigne de courant, et des valeurs limites de protection. L'interface sur la page web est aussi dotée d'oscilloscopes ajustables de signaux pertinents et sera utilisée dans le cadre de ce travail pour ajuster les gains des contrôleurs et valider l'obtention des résultats désirés. De plus, de nouvelles fonctionnalités paramétrables pourront être ajoutées et modifiées pour l'ajustement de l'opération du convertisseur de puissance tel que la fenêtre de variation de l'hystérésis. La Figure 6-6 montre un exemple de la page web et de ses différents menus.

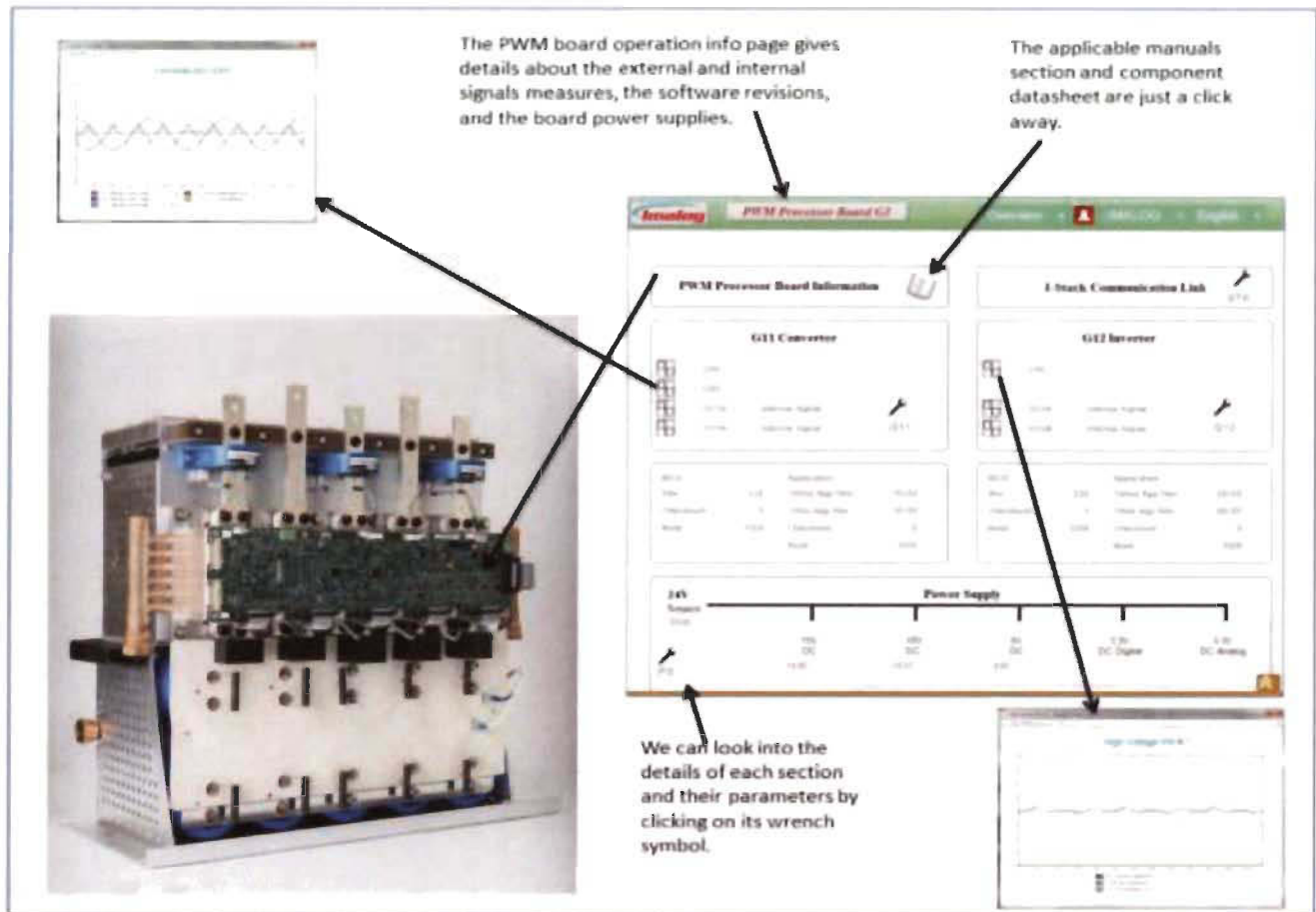


Figure 6-6 Serveur web et ses fonctions intégrées au I-Stack™ [19]

Le produit a été conçu pour fournir un courant maximal à la sortie du convertisseur de l'ordre de 600 A pour les deux branches jumelées. Le test suivant avait pour but de faire travailler le convertisseur au maximum de son courant et de vérifier la performance des équipements électroniques en lien avec leur échauffement. Il a été réalisé à vide, et donc la sortie était court-circuitée au lieu d'être connectée à une charge. De cette façon, la valeur maximale a pu être validée en plus de vérifier que les deux branches du convertisseur étaient balancées. On remarque, d'après la courbe de la Figure 6-7 obtenue à la page web, que le courant de la branche L1 est de 301 A et celui de la branche L2 de 300 A pour une sortie totale de 600 A.

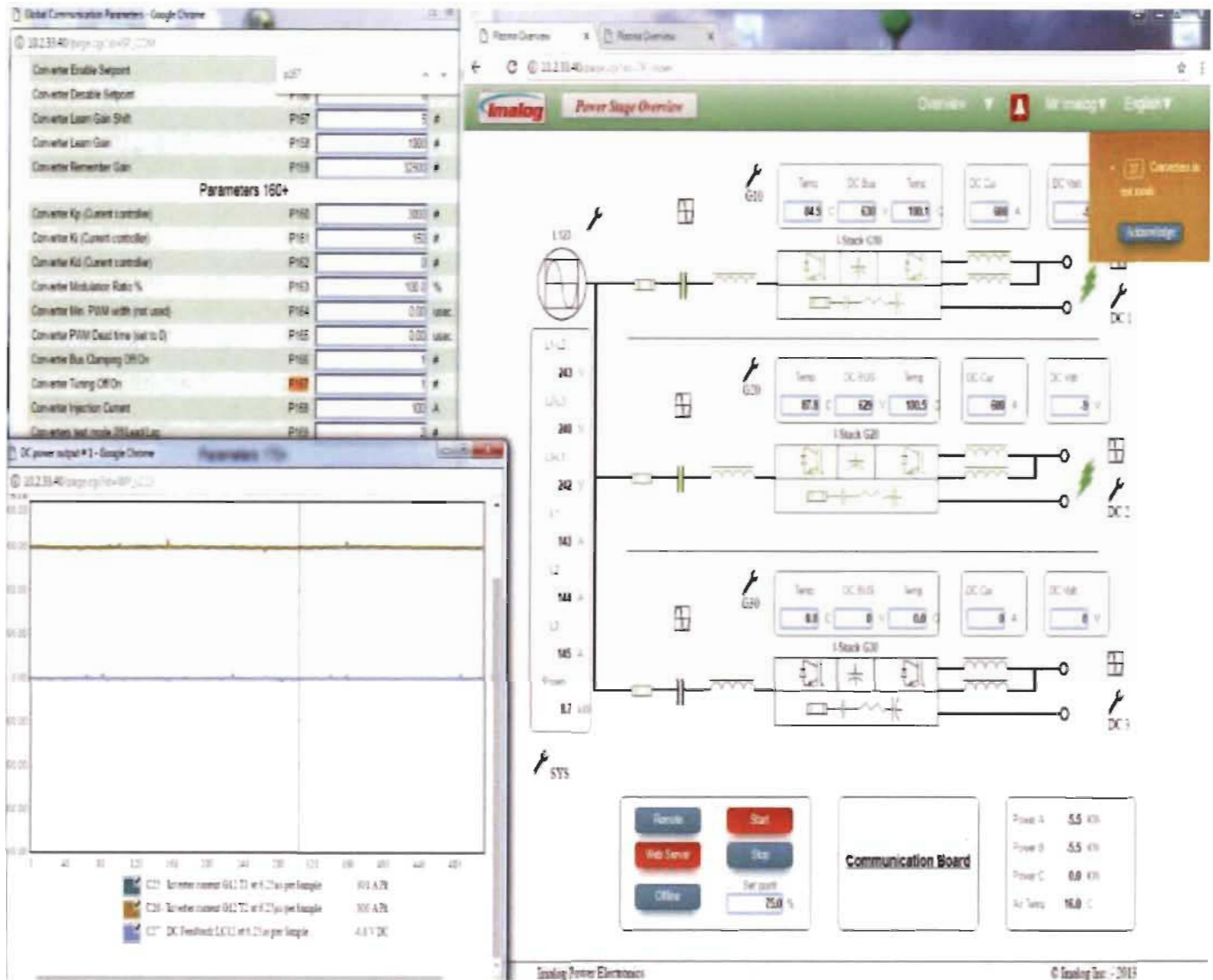


Figure 6-7 Test en court-circuit du convertisseur entrelacé de 600 A (300 A par phase)

La figure de droite montre la page web et ses trois convertisseurs conçus pour un maximum de trois torches à plasma par unité d'alimentation d'électrique (UAE). Dans cet exemple, deux convertisseurs étaient en marche dont leur sortie est lisible dans boîte intitulée "DC Cur". Dans le côté gauche de la figure, on retrouve dans le haut un exemple de menu de paramètres ajustables. La forme d'onde du bas représente quant à elle, l'oscilloscope généré

à partir des deux capteurs de courant placés à la sortie. On distingue deux mesures nommées dans le bas par la légende C25 et C26 qui représentent respectivement les courants dans chacune des branches.

Cette courbe nous permet de constater que les deux courants sont parfaitement balancés entre les deux branches du convertisseur puisqu'ils sont identiques et possèdent la même amplitude. La température à plein courant des transistors se situe près de 100 degrés Celsius ce qui est élevé, mais acceptable étant donné que le refroidissement se fait à l'air plutôt qu'à l'eau basée sur les spécifications du produit.

6.4 Essai-usine (torche à plasma)

La prochaine étape de la validation expérimentale consistait à effectuer des tests pratiques dans une usine opérant de vraies torches à plasma. La Figure 6-8 montre une torche à plasma réelle qui peut produire un jet de plasma de plus de 5 000 °C, et donc idéal pour la production de poudre sphérique à partir de matériaux à point de fusion élevée. Ce modèle peut être utilisé pour des puissances de 50 à 500 kW et ses électrodes permettent un temps d'opération d'environ 1000 heures.



Figure 6-8 Torche à plasma [39]

Trois torches de ce type sont intégrées dans un réacteur à plasma et placées selon la configuration de la Figure 6-9 d'où la nécessité d'intégrer trois convertisseurs entrelacés par réacteur. Chaque convertisseur est indépendant et contrôle une des trois torches à plasma du réacteur.

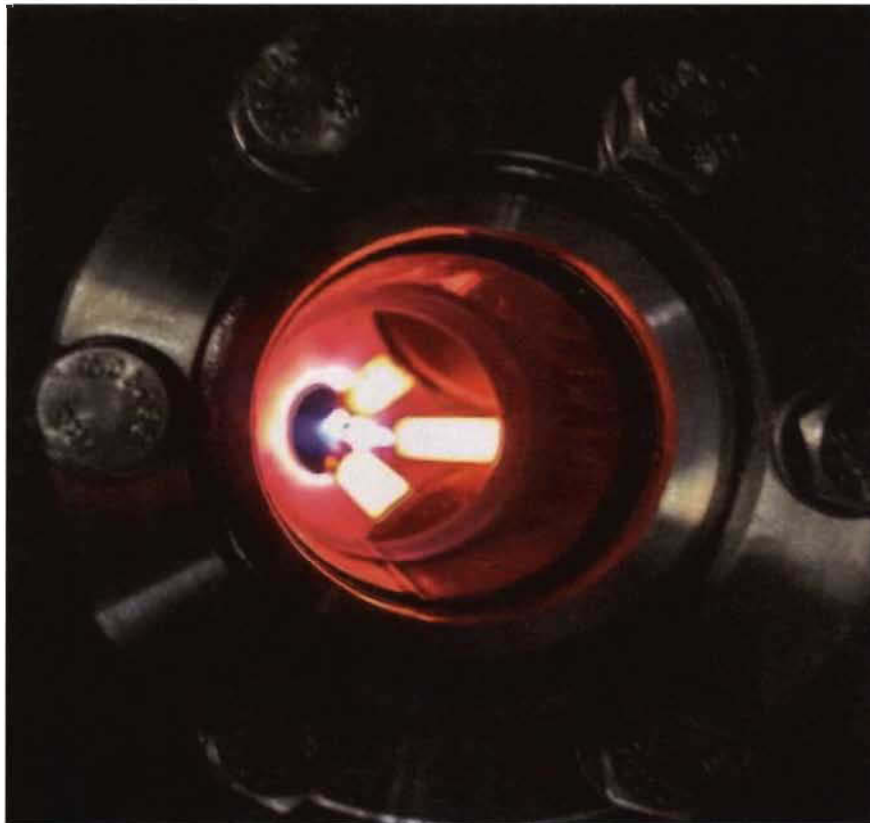


Figure 6-9 Réacteur à plasma composé de trois torches [39]

La Figure 6-10 présente le produit final (PSU) l'unité d'alimentation électrique.



Figure 6-10 Unité d'alimentation électrique (UAÉ) développée par Suez WTS

Ces tests ont été effectués dans le cadre d'une mise en service de Suez WTS. L'objectif de la validation expérimentale était de réussir à opérer les sources de courant continu sur des réacteurs à plasma en réussissant le démarrage et le maintien de l'arc électrique une fois établi.

Lors de cette période de test, plusieurs difficultés nécessitant des ajustements des contrôleurs ont été rencontrées. Tout d'abord, le contrôleur bang-bang n'a pas donné les résultats attendus en termes de performance. Sa réponse beaucoup trop brusque rendait le courant instable et difficile à ramener dans la plage d'opération tel que vu lors des simulations. La Figure 6-11 présente un exemple d'instabilité d'un contrôleur mal ajusté qui faisait varier le courant de la torche brusquement sur une plage d'environ 350 A.

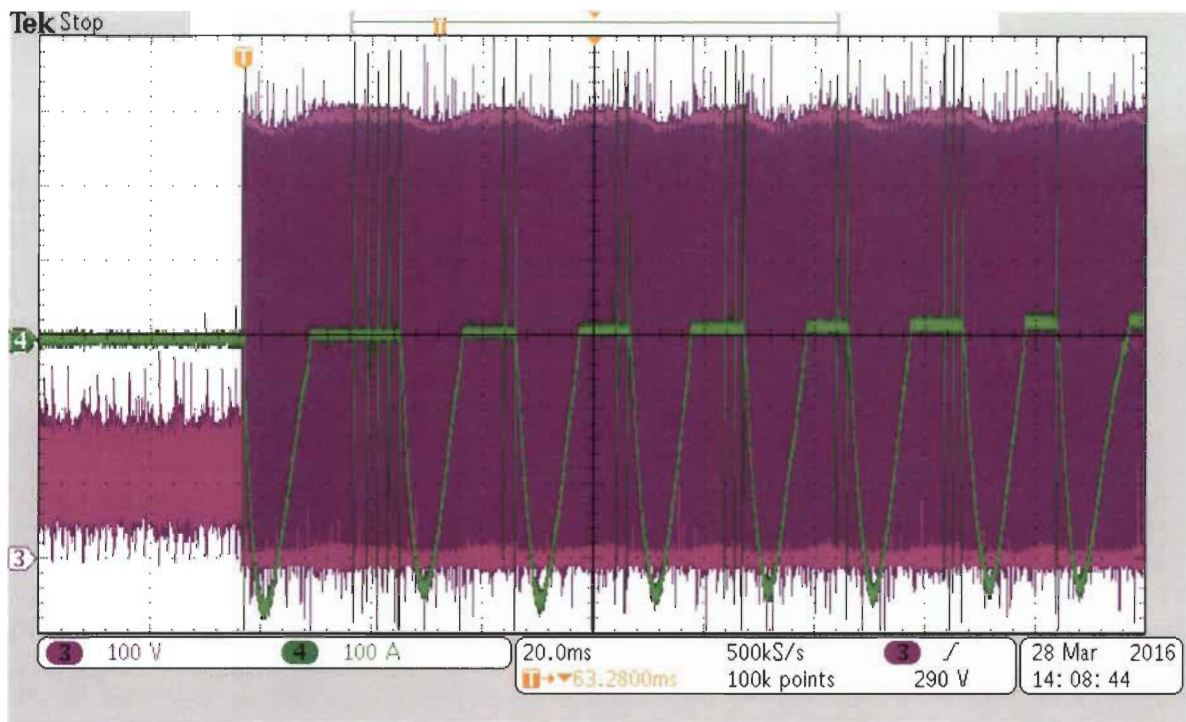


Figure 6-11 Exemple de contrôleur bang-bang mal ajusté

Note : le courant est positif et devrait être lu dans l'autre direction.

Suite à un ajustement de la fenêtre du gain, il a été possible d'obtenir un meilleur contrôle du courant tel que montré à la Figure 6-12 puisque l'oscillation du courant s'est étalée sur un plus petit nombre de cycles et que le courant semblait revenir à l'intérieur de la plage. Une acquisition sur une plus longue période de temps aurait permis d'observer le comportement du courant en régime permanent.

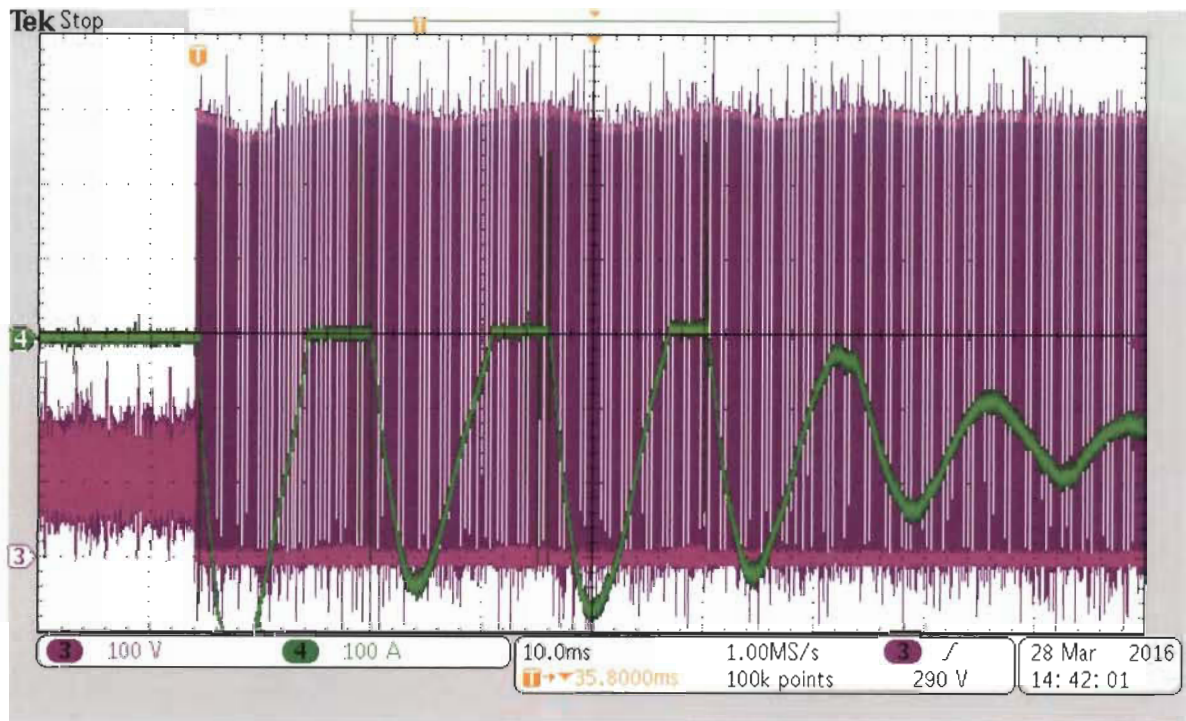


Figure 6-12 Exemple de démarrage agressif

Ce comportement montre la difficulté rencontrée par les chercheurs à appliquer pratiquement les notions théoriques ou simulées. Plusieurs facteurs réels sont bien souvent négligés lors des simulations rendant l'application concrète face aux comportements réels complexes. À titre d'exemple, les valeurs d'inductance permettant d'obtenir de bons résultats théoriques sont souvent de l'ordre des milli Henry. Il est cependant impensable dans un circuit pratique et industriel de dépasser les quelques centaines de micro Henry en raison du prix fastidieux et de la grosseur physique d'un tel composant de puissance. Aussi, les délais liés à la disponibilité des valeurs des données de retour sont plus longs que ceux étudiés en simulation. Ces quelques conditions mentionnées ci-haut expliquent pourquoi les résultats pratiques peuvent différer des résultats théoriques.

Dans ce cas, le contrôleur de type PID a donné sans doute de bien meilleurs résultats et a permis de stabiliser le courant de la torche et de le maintenir. La protection de surintensité, qui sera démontrée dans la prochaine section, sous forme d'un limiteur a quant à elle permit une réaction rapide en cas d'événement transitoire. La Figure 6-13 montre un exemple de démarrage réussi d'une torche à plasma dont le courant était contrôlé par un PID.

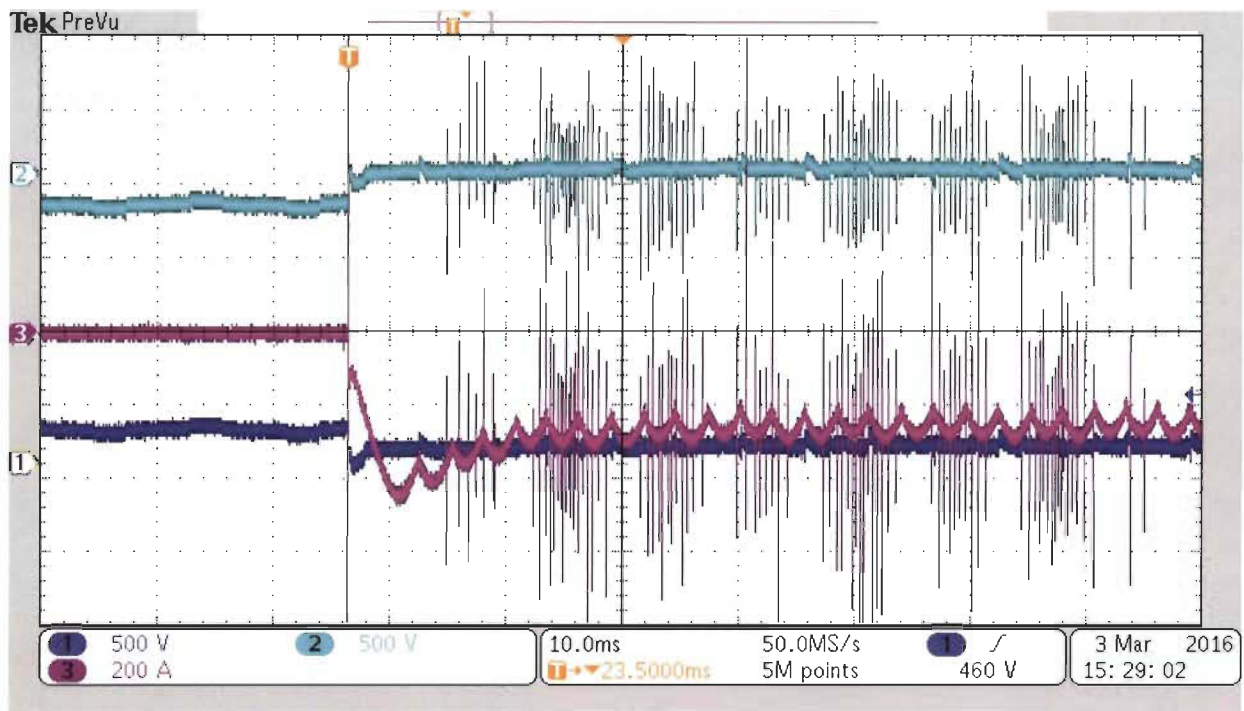


Figure 6-13 Courant à la torche contrôlée

Courbe 1 et 2: Tension à la torche (en V) – Tension de 250V

Courbe 3 : Courant de la torche (en A) – Consigne de 300A

Les Figure 6-14 et Figure 6-15 montrent, quant à elles le courant de chacune des branches L1 et L2 tel que capturé à l'aide du serveur web. On remarque le déphasage de 180 degrés des deux courants et une amplitude similaire se stabilisant autour de 100 Ampères.

DC power output # 1

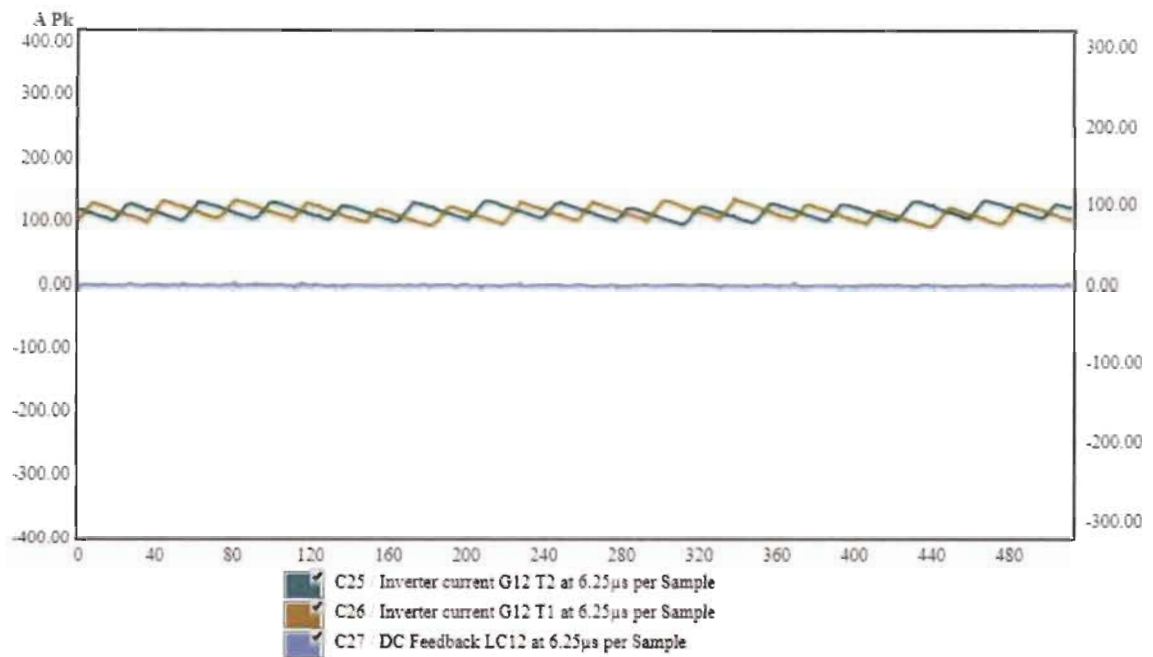


Figure 6-14 Mesure des courants L1 et L2 pour une consigne de 200 A

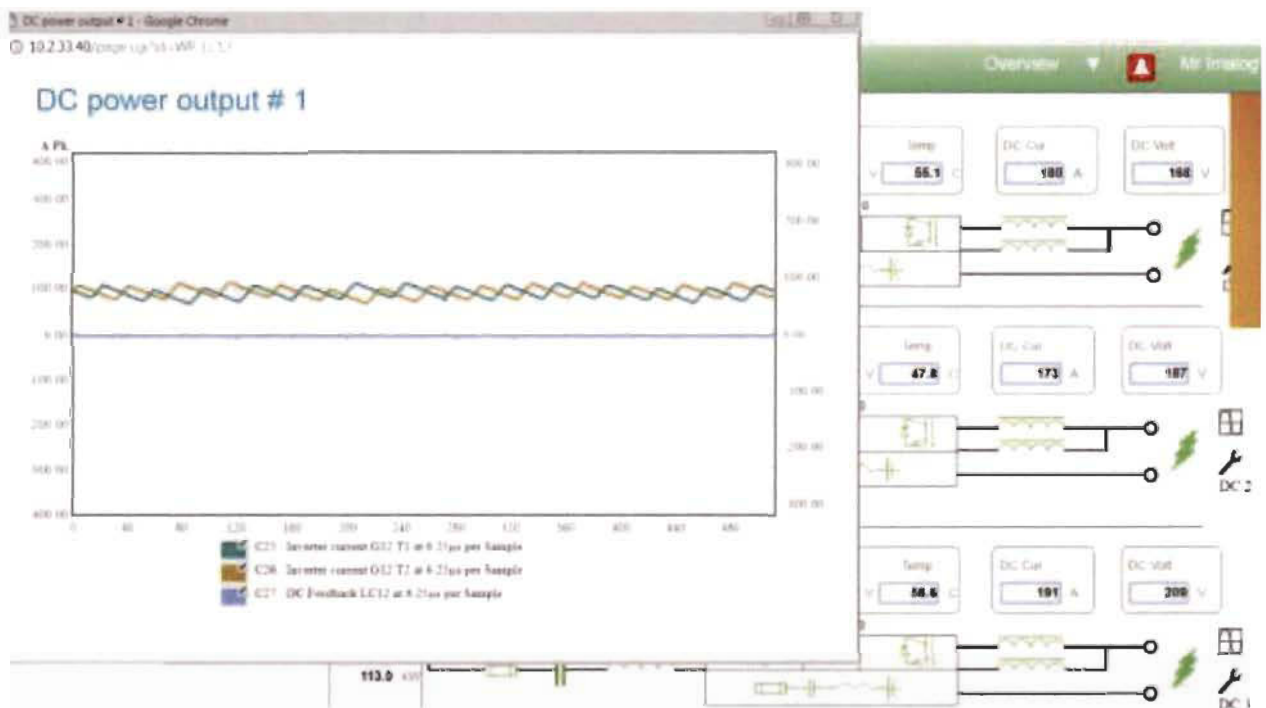


Figure 6-15 Mesures des courants L1 et L2 pour une consigne de 180 A sur la torche #1

Le serveur web permet également de récupérer les différents points des courbes de courant. Afin de visualiser la somme des courants et par le fait même, l'amplitude et l'ondulation résultante générée par le convertisseur, les données des trois courbes ont été tracées sur la Figure 6-16.

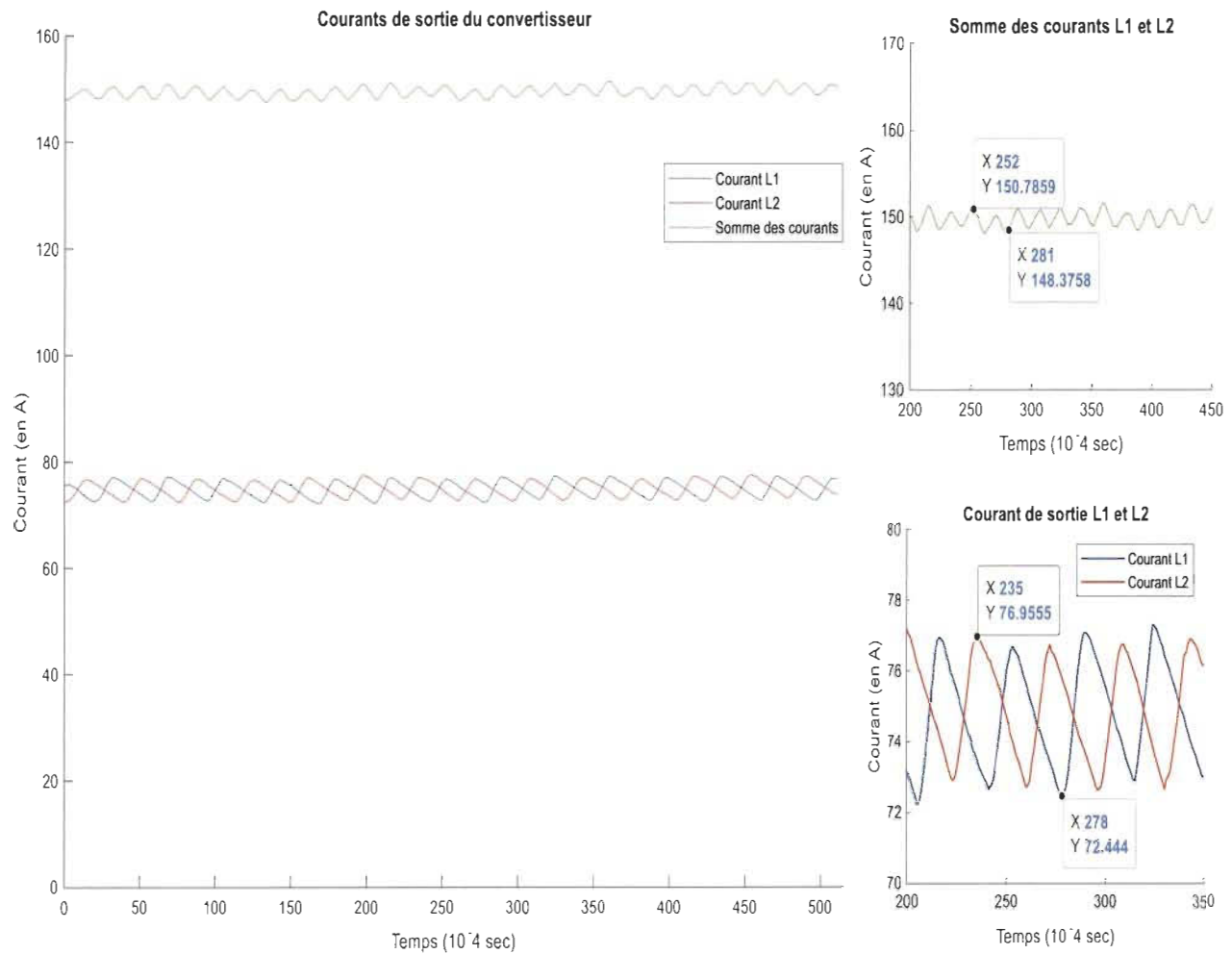


Figure 6-16 Résultats expérimentaux des courants de sortie alimentant une torche à plasma

La commande de courant donnée au convertisseur était de 150 A, et on remarque que la somme des courants illustrée dans la courbe en vert du haut du graphique à gauche suit bel

et bien cette consigne. On remarque également que le courant total présente environ la moitié de l'ondulation de chaque courant individuel circulant dans L1 et L2 et sa fréquence est deux fois plus élevée. On peut donc affirmer que la commande respecte les critères suivants recherchés :

- Stabilité en régime permanent des courants et respect de la consigne demandée;
- Décalage des commandes de 180 degrés entre chaque branche d'inductance;
- Réduction d'un facteur de deux de l'ondulation sur le courant alimentant la torche.

6.5 Protection

La prochaine étape des tests pratiques consiste à vérifier le fonctionnement des protections. La Figure 6-17 montre un exemple d'une tentative de limitation du courant. Les oscillations à haute fréquence représentent l'alternance des transistors qui sont alternativement éteints et allumés dans le but de diminuer le courant. De manière plus précise lorsque le courant augmente et dépasse la limite de cette protection, le transistor arrête toute commutation afin de permettre la diminution du courant. Une fois que le courant baisse sous le niveau de limite permise, la commande est à nouveau envoyée et le transistor peut reprendre sa commutation. Dans cet exemple, puisque le courant continuait tout de même à augmenter après le réamorçage des transistors, un arrêt a été requis.

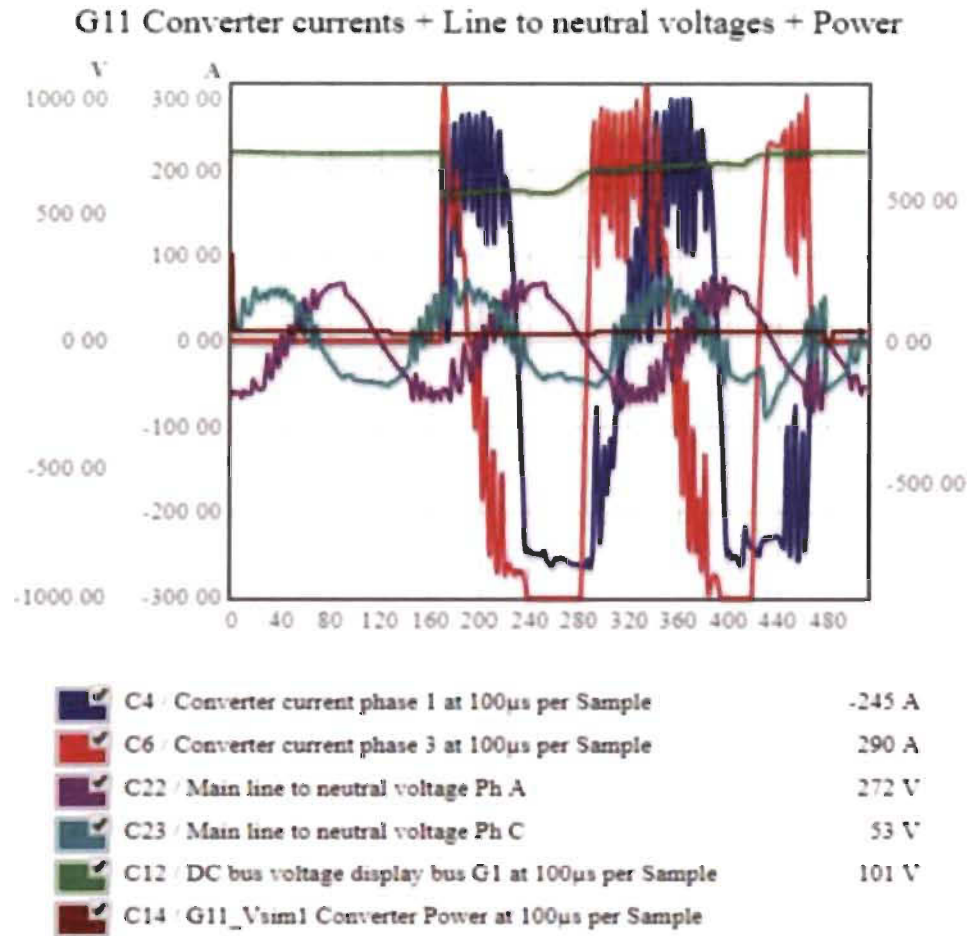


Figure 6-17 Limitation du courant à la suite d'une perturbation externe

Le deuxième exemple présenté à la Figure 6-18 montre une faute produite à la suite d'une surintensité important. Puisque le courant a monté brusquement en environ 300 us, les contrôleurs n'étaient pas en mesure de réagir assez vite pour empêcher cet évènement. Un arrêt instantané a donc été requis afin de prévenir un bris d'équipement. Cette protection a été programmée de manière à envoyer un code d'erreur au processeur maître qui commandera un arrêt immédiat à la réception de cette erreur. Une intervention de maintenance sera nécessaire pour identifier la cause de cet évènement.

PSU State Snapshot

G11 Over Current

G11 Converter currents + Line to neutral voltages + Power

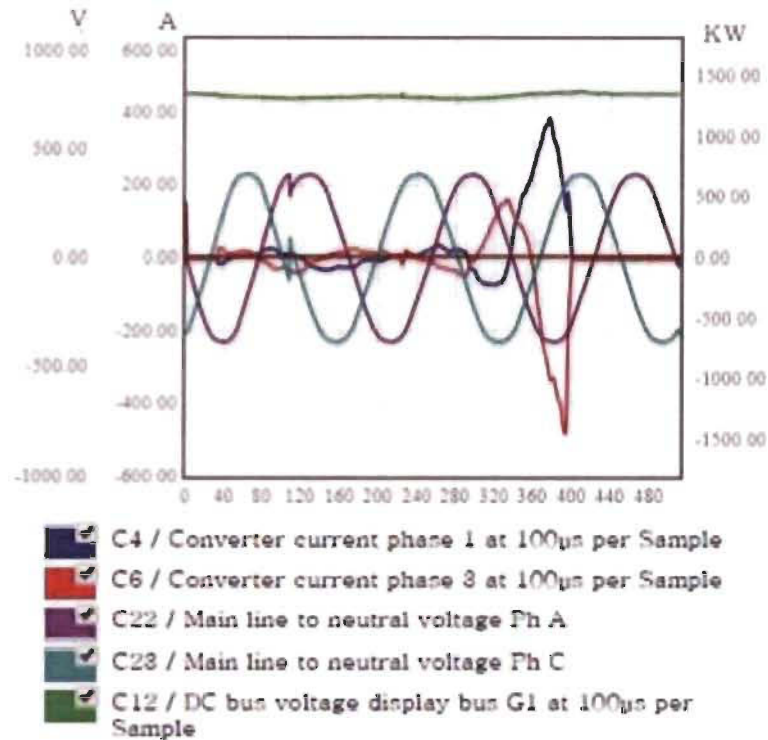


Figure 6-18 Surintensité importante au démarrage nécessitant un arrêt

L'ajustement de cette valeur ainsi que du temps de délai de détection se fait par les menus de la page web selon les réglages suivants montrés à la Figure 6-19.

Dans le menu de protection, le premier paramètre constitue la limite haute du courant pointe en ampère, et le deuxième donne le délai de détection avant l'émission d'une faute et donc l'arrêt du système.

Converter Protection			
Converter Current High Limit peak	P172	450	APk
Converter Current pk Delay	P173	0.2	msec

Figure 6-19 Menu pour l'ajustement des limites du courant

6.6 Conclusion

En conclusion, cette sixième partie a été très bénéfique dans ce projet, puisqu'elle a permis d'observer concrètement le comportement des torches à plasma et leurs différents modes de réponse en fonction des contrôleurs implémentés. Elle a également facilité la validation des méthodes de contrôle, principalement du contrôleur parallèle. Il a été possible de constater que contrairement à la simulation, le contrôleur de type PI a donné de meilleurs résultats pour un démarrage réussi et pour l'opération en régime permanent d'un réacteur de torches à plasma. Les résultats expérimentaux ont confirmé la pertinence et la performance du convertisseur entrelacé par l'obtention d'un courant continu à la torche de très faible ondulation.

Le serveur web intégré dans les I-Stacks™ est un outil très efficace et ajoute une grande flexibilité au processus par sa possibilité de modifier les paramètres tels que les gains sans modification aux programmes et lors de l'opération du système. De plus, son système de sauvegarde de courbes permet de récupérer efficacement les données désirées afin de les étudier.

Finalement, bien que les protections discutées dans ce chapitre ne soient pas celles mises en première ligne dans un tel système, puisque les différentes normes d'équipement industriel

(CE, UL, etc.) requièrent que les protections de première ligne soient des dispositifs matériels tels que des fusibles et des disjoncteurs, ces protections de deuxième ligne sont très utiles afin de protéger les équipements.

Chapitre 7 - Conclusion

En conclusion, ce travail réalisé, avec l'aide de mes collègues, a donné naissance à un nouveau produit dans la gamme de Suez WTS qui a rapporté fruits par la vente de cinq unités d'alimentation électrique pouvant opérer un total de quinze torches à plasma de 50 kW chaque. Cette nouvelle adaptation de topologie à une application de haut courant a fait ses preuves et a permis de tirer profit des avantages de cette technique tout en limitant les coûts d'équipement afin de permettre une meilleure concurrence du produit sur le marché. Il a été pertinent de développer une nouvelle application pour l'I-Stack™ de Suez WTS en minimisant l'ajout de composants et par l'utilisation de sa plateforme très flexible et performante.

La comparaison entre les résultats obtenus en simulation et sur un système de torche réel a permis de constater les défis qu'une telle adaptation entre deux mondes différents apportait. En effet, les systèmes réels sont soumis à plusieurs phénomènes et lois physiques souvent négligés dans des simulations idéales, et il est primordial dans un tel projet d'identifier adéquatement la méthode fournissant les meilleurs résultats à l'aide de validation expérimentale. Dans ce projet, l'utilisation d'une topologie de convertisseur DC-DC entrelacé accompagné d'un contrôleur PID et de protection limitant le courant de sortie a donné les résultats les plus concluants sur un réacteur à plasma composé de trois torches.

Quant à l'étude des contrôleurs parallèles nouvellement adaptée à ce type de convertisseur, son implémentation est très prometteuse. Cette technique nécessite cependant

des améliorations qui pourraient être réalisées dans le cadre de la poursuite de ce projet au troisième cycle.

À titre d'exemple, il serait pertinent d'évaluer la possibilité d'utiliser une inductance trois phases au lieu de simple phase puisque cela permet d'augmenter sa valeur à faible prix. Il serait donc intéressant de voir si l'effet obtenu en simulation serait plus reproductible.

Ensuite, de futurs travaux pourraient évaluer la possibilité d'utiliser un transformateur de découplage à la sortie des inductances étant donné que ce dernier permet de diminuer davantage l'ondulation sur le courant de sortie. Cette étude devra être réalisée en tenant compte des bénéfices supplémentaires gagnés par rapport au coût lié à l'ajout d'équipements supplémentaires.

Troisièmement, la topologie du Buck entrelacé pourrait être combinée à la topologie dite convertisseur miroir, puisque selon la littérature [32] le rendement serait supérieur après combinaison des deux montages. Une fois de plus, la complexité de cette topologie et le coût des composants électroniques supplémentaires devront être considérés par rapport aux rendements réels et pratiques que cette méthode apporterait.

Finalement, ces avancées technologiques pourraient être utilisées dans de nombreuses applications nécessitant des sources d'énergie à courant élevé qui sont de plus en plus populaires avec la venue des sources d'énergie renouvelable sur le marché.

Références

- [1] Weber, A. (2018). Additive Manufacturing Takes Off in Aerospace Industry. [En ligne]. Disponible : <https://www.assemblymag.com/articles/93176-additive-manufacturing-takes-off-in-aerospace-industry>.
- [2] Krowka, J., "Étude des modes de résonance d'une torche à plasma d'arc associé à une injection synchrone pour la réalisation de dépôts par voie liquide", Université de Limoges, 2015.
- [3] Lee, J-P., Cha, H., Shin, D. Lee, K-J., Yoo, D-G., Yoo, J-Y., "Analysis and design of coupled inductors for two-phase interleaved DC-DC converters" *Journal of power electronics*, vol. 13, no. 3, p.339-348, mai 2013.
- [4] Murashov,I., Frolov,V., Ivanov,D., "Numerical simulation of DC air plasma torch modes and plasma jet instability for spraying technology" *IEEE transactions*. Doi: 978-1-5090-0445-4, 2016.
- [5] Chan-Nau Hong,F., Yan,C-J., "Synthesis and characterization of silicon oxide nanoparticles using an atmospheric DC plasma torch" *Advanced Power Technology*, no. 29, p220-229, 2017.
- [6] Cha, D-J., "Development of Interleaved Buck Converter using Soft-Switching for High Current Applications". *IEEE transactions*. Doi: 978-1-4799-4047-9, 2014.
- [7] Bendjebbar, F., "Modélisation hydrodynamique d'une torche à plasma couplée inductivement", Université Blaise Pascal - Cermont-Ferrand II., 2016.
- [8] Solanki,J., Frohleke,N., Bocker,J., Averberg,A., Wallmeier,P., "High-current variable-voltage rectifiers : start of the art topologies" *The Institution of engineering and technology*, vol 8, Iss.6, pp. 1068-1080, 2014.
- [9] L Fulcheri,L., Rollier, J-D., Gonzalez, J., "Design and electrical characterization of a low current-high voltage compact arc plasma torch" *Plasma sources science and technology*, page 183-192, nov. 2006.
- [10] Rehmet, C., "Étude théorique et expérimentale d'une torche plasma triphasée à arcs libres associée à un procédé de gazéification de matière organique", École Nationale Supérieure des Mines de Paris.2014.

- [11] Nelatury, S., Hemminger, T., Sadiku, Matthew, "An equivalent circuit model of a plasma core inductor", *IEEE transactions on plasma science*, vol. 33, no. 3, p. 1100-1105, 2005.
- [12] "Fabrication additive", dans Wikipédia, 18 décembre 2017. [En ligne]. Disponible : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fabrication_additive
- [13] "État plasma", dans Wikipédia, 13 janvier 2018. [En ligne]. Disponible : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tat_plasma
- [14] "Torche plasma", dans Wikipédia, 11 janvier 2018. [En ligne]. Disponible : https://fr.wikipedia.org/wiki/Torche_%C3%A0_plasma
- [15] Suh, Y., Jung, K. "A medium voltage power supply with enhanced ignition characteristics for plasma torch in waste disposal system" *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, p.1463-1470, sept. 2010.
- [16] Hrabovsky, M., Kopecký, V., Sember, V., "Properties of Hybrid Water/Gas DC Arc Plasma Torch", *IEEE Transactions on plasma Science*, Vol. 34, No. 4, 2006.
- [17] La rédaction. (2009). Entre les déchets et l'électricité, une torche à plasma. *Techniques de l'ingénieur*. [En ligne]. Disponible : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/entre-les-dechets-et-lelectricite-une-torche-a-plasma-3837/>
- [18] Ladoux, P., Postiglione, G., Foch, H., Nuns, J. "A comparative study of AC/DC converters for high-power DC arc furnace", *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 52, no. 3, p.747-757, 2005.
- [19] Tremblay, M., "Easy to use power electronics converter". École de technologie supérieure'', Université du Québec, 2017. [En ligne]. Disponible : http://espace.etsmtl.ca/1953/1/TREMBLAY_Marco.pdf
- [20] Duan, Z., Herberlein, J., "Arc instabilities in a plasma spray torch", *Journal of thermal spray technology*, page 44-51, oct. 2000.
- [21] Scaini, V., Ma, T. "High Current DC choppers in the metals industry" *IEEE transactions*. Doi: 10.1049/iet-pel.2014.0533, 2010.
- [22] Garcia, M-G., Matakas, L., "Three-phase, self-commutated, current source converter controller for plasma torches applications", *IEEE transactions*. Doi: 0-7803-7912-8/03, 2003.
- [23] Pacheco-Sotelo, J., Pena-Eguiluz, R., Segvoia, A., Sanchez, G. "Plasma Torch Ignition by a Half Bridge Resonant Converter", *IEEE Transactions on plasma science*, vol. 27, No.4, page 1124-1130, 2004.

- [24] Cakor, A. (2014). Medical: Alphaform – Production of hip implant by using additive manufacturing.[En ligne]. Disponible à https://www.eos.info/press/case_study/additive_manufactured_hip_implant.
- [25] La société Lincoln Electric (2018). Le fonctionnement du Plasma. [En ligne]. Disponible : <https://www.lincolnelectric.com/fr-fr/support/process-and-theory/Pages/how-a-plasma-cutter-works.aspx>
- [26] Ilic,M. Maksimovic,D., "Digital Average Current-Mode Controller for DC–DC Converters in Physical Vapor Deposition Applications", *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 23, No.3, page 1428-1436, 2008.
- [27] Ardakani, E-S., "Numerical and Experimental Study of the Arc Fluctuations in a DC Plasma Torch", *Mechanical and Industrial Engineering Department University of Toronto*, 2016.
- [28] Trelles, J.P.; Chazelas, C.; Vardelle, A.; Heberlein, J.V.R. ‘‘Arc Plasma Torch Modeling’’ J. Therm. Spray Technol, vol.18, p.728-752, 2009.
- [29] Yang,X. Zong,S. Fan,G., ‘‘Analysis and validation of the output current ripple in interleaved Buck Converter’’, *IEEE*, p.846-851, 2017.
- [30] Siebert, T., Troedson, A., Ebner, S., ‘‘AC to DC power conversion now and in the Future’’, *IEEE Transactions*, vol. 38, p. 934–940, 2002.
- [31] "Ripple current", dans *Wikipédia*, 29 juillet 2019. [En ligne]. Disponible : [https://en.wikipedia.org/wiki/Ripple_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ripple_(electrical))
- [32] Nicolas Videau., "Convertisseurs continu-continu non isolés à haut rapport de conversion pour Piles à Combustible et Electrolyseurs - Apport des composants GaN" Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2014.
- [33] Infineon. Dual-Channel™ - IGBT Modules. Description & Application Manual 2SP0115T, 2019.
- [34] Cormier,G. (2009). Circuits RL et RC. [En ligne]. Disponible : http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/Circuits/GELE2112_Notes5.pdf
- [35] Plasma technology. (2019). What is plasma technology. [En ligne]. Disponible : <https://www.balticnet-plasmatec.org/plasma-technology/>
- [36] K. J. Astrom and T. Hagglund., "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning", Instrument Society of America, *Research Triangle Park, NC*, 1995.
- [37]Dewesoft. (2019). PID Control. [En ligne]. Disponible : <https://dewesoft.pro/online/course/pid-control>

- [38] West control solution. (2019). Understanding On-Off Temperature Controllers. [En ligne]. Disponible : <https://www.west-cs.com/news/understanding-on-off-temperature-controllers/>
- [39] Pyrogenesis Canada Inc. (2019). Poudres métalliques atomisées par plasma. [En ligne]. Disponible : <https://www.pyrogenesis.com/fr/>
- [40] IEEE "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992) , vol., no., pp.1-29, 11 June 2014
- [41] Wescott, T., PID Without a PhD, Wescott Design Services, 2006. [En ligne]. Disponible: <https://www.wescottdesign.com/articles/pid/pidWithoutAPhd.pdf>