

Filière Systèmes industriels
Orientation Power and Control

Diplôme 2013

Lucas Farner

*Réalisation d'un banc d'essai
pour moteurs électriques*

Professeur
Samuel Chevailler

Expert
Christian Koechli

Date de la remise du rapport
12 juillet 2013

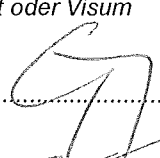

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

SI	TV
X	X

Daten der Diplomarbeit

<input checked="" type="checkbox"/> FSI <input type="checkbox"/> FTV	Année académique / Studienjahr 2012/13	No TD / Nr. DA pc/2013/29
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie Valélectric Farner SA <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student Lucas Farner <hr/> Professeur / Dozent Samuel Chevailler	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) Dr. Christian Koechli	

Titre / Titel <p style="text-align: center;">Réalisation d'un banc d'essai pour moteurs électriques</p>
Description et Objectifs / Beschreibung und Ziele <p>Le but du travail de diplôme est la réalisation d'un banc d'essai à tension variable pour tester les moteurs électriques avant leur livraison. Pour se faire, il est prévu d'installer ce régulateur à induction dans un dépôt annexe au local de test. Cette machine ayant été récupérée dans un ancien laboratoire, les caractéristiques de cette machine ne sont pas connues. La machine devant être révisée, les grandeurs géométriques pourront être néanmoins connues.</p> <p>Les points suivants devront être réalisés durant le travail de diplôme :</p> <ul style="list-style-type: none"> — Etude théorique, modélisation analytique et numérique de la machine — Définir un nouveau bobinage pour obtenir une tension de sortie proche de 0V — Définir les valeurs limites d'essais en tenant compte des limites thermiques et magnétiques — Etudier et dimensionner l'alimentation et les protections — Etudier la possibilité de monter un redresseur triphasé à la sortie du régulateur — Etudier la commande à distance de la machine — Comparer l'étude théorique avec les mesures sur site.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Resp. de la filière <i>Leiter des Studieng.</i> :  ¹ Etudiant/Student: 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 13.05.2013 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 12.07.2013 Expositions / Ausstellungen Diplomarbeiten: 28 – 30.08.2013 Défense orale / Mündliche Verfechtung: Semaine Woche 36
---	---

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement le caractère confidentiel du travail de diplôme qui lui est confié et des informations mises à sa disposition.

Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der Student, die Vertraulichkeit der Diplomarbeit und der dafür zur Verfügung gestellten Informationen zu wahren.

Réalisation d'un banc d'essai pour moteurs électriques

Diplômant

Lucas Farner



Objectif du projet

Le but du travail de diplôme est la transformation d'un régulateur à induction (transformateur tournant), ceci afin de disposer d'une source de tension variable adaptée aux essais de machines électriques chez Valélectric Farner SA.

Méthodes | Expériences | Résultats

Premièrement, le régulateur à induction a été testé dans sa configuration d'origine. Cela a permis de déterminer sa plage d'utilisation, soit une variation de la tension de ligne en sortie de 195 [V] à 575 [V]. La tension minimale étant trop grande pour des essais de moteurs électriques, le régulateur à induction a dû être adapté.

Deuxièmement, la machine a été démontée afin de connaître ses caractéristiques électriques et magnétiques. Un modèle analytique et une simulation par éléments finis ont été réalisés afin de définir un nouveau bobinage permettant d'obtenir une tension de sortie proche de 0 [V].

Troisièmement, le régulateur à induction a été bobiné à neuf puis remonté. Suite à cela, une campagne de tests a été effectuée afin de vérifier son bon fonctionnement et ses limites d'utilisations. Le banc de test dans sa nouvelle configuration permet une variation de la tension de ligne en sortie de 12 [V] à 810 [V] pour un courant de sortie de 80 [A].

Finalement, un redresseur triphasé pouvant se brancher en sortie de la machine a été dimensionné et réalisé. Ainsi, une source de tension continue variable avec un courant de sortie élevé est disponible pour tester les moteurs à courant continu.

Travail de diplôme | édition 2013 |

Filière

Systèmes industriels

Domaine d'application

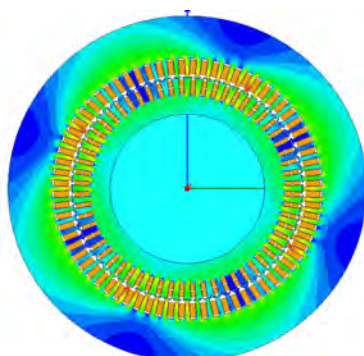
Power and Control

Professeur responsable

Samuel Chevailler

samuel.chevailler@hevs.ch

Partenaire



Répartition du champ magnétique dans le régulateur à induction lors d'une marche à vide.

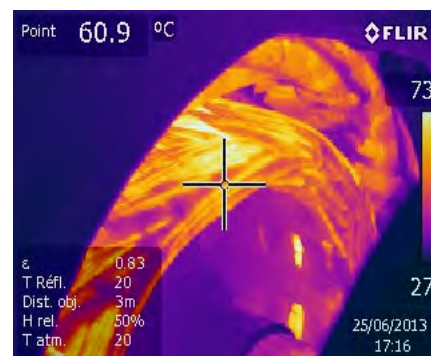


Image thermique des têtes de bobines du régulateur à induction lors d'un test en court-circuit.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	Cahier des charges	1
1.2	Liste des tâches	1
1.3	Description de l'entreprise mandante	2
1.4	Procédures de réparation d'une machine électrique	2
1.5	Analyse des forces et des faiblesses du système	2
2	THÉORIE DU RÉGULATEUR À INDUCTION	4
2.1	Description mécanique	4
2.2	Descriptif de fonctionnement	5
2.3	Schéma équivalent du régulateur à induction	8
2.3.1	Calcul du schéma équivalent par superposition	9
2.3.2	Puissances et rendement du régulateur à induction	13
2.3.3	Echauffement adiabatique du bobinage	13
2.3.4	Calcul du couple de la machine	14
2.3.5	Script de calcul analytique et validation du schéma équivalent	14
2.3.6	Détermination des composants du schéma par mesure	15
2.3.7	Détermination des composants du schéma par calculs	17
2.3.8	Script de calcul des composants	19
3	ESSAIS SUR LE SYSTÈME INITIAL	20
3.1	Définitions	20
3.2	Personnes présentes et appareils de mesures	20
3.3	Préparation à l'essai	20
3.4	Mesures ohmiques	21
3.4.1	Schéma de continuité	21
3.4.2	Mesure d'isolation	22
3.5	Marche à vide	22
3.5.1	Variation de la tension d'entrée	22
3.5.2	Variation de l'angle à tension nominale	23
3.5.3	Formes des tensions	26
3.5.4	Puissance à vide	29
3.5.5	Détermination de X_h et R_{fer} du schéma équivalent	29
3.6	Essai en court-circuit	30
3.6.1	Résultats	30
3.6.2	Détermination de $X_{\sigma s}$ et $X'_{\sigma r}$ du schéma équivalent	31
3.7	Essais sous charge	32
3.7.1	Schéma de la mesure	32
3.7.2	Résultats	33

4	RELEVÉS MAGNÉTIQUES ET ÉLECTRIQUES	35
4.1	Caractéristiques électriques et bobinage	35
4.1.1	Rotor	35
4.1.2	Stator.....	39
4.1.3	Rapport de transformation	42
4.2	Caractéristiques magnétiques	42
4.2.1	Rotor	42
4.2.2	Stator.....	42
4.2.3	Entrefer	43
4.2.4	Résumé des grandeurs mécaniques	43
5	SIMULATION DE LA MACHINE EXISTANTE	44
5.1	Modélisation de la machine	44
5.1.1	Dimension mécanique	44
5.1.2	Bobinage.....	45
5.1.3	Circuit externe.....	45
5.2	Simulation de la machine	46
5.2.1	Comportement à vide.....	46
5.2.2	Comportement en court-circuit	48
5.2.3	Comportement avec une charge ohmique.....	49
5.2.4	Discussion des résultats de simulation	49
6	MODÈLE ANALYTIQUE DU SYSTÈME EXISTANT	50
6.1	Modélisation de la machine	50
6.1.1	Modélisation des composants du schéma équivalent par la mesure	50
6.1.2	Modélisation des composants du schéma équivalent par le calcul.....	50
6.2	Tableau comparatif.....	51
6.3	Discussion des résultats du calcul analytique	52
7	DÉFINITION DU NOUVEAU BOBINAGE	53
7.1	Procédure de dimensionnement	53
7.1.1	Nombre de conducteurs.....	53
7.1.2	Première estimation du bobinage par calcul analytique	54
7.1.3	Approfondissement et simulation des différents bobinages	54
7.2	Choix final du bobinage pour la remise à neuf	56
7.3	Caractéristiques du nouveau bobinage	56
7.3.1	Schéma de bobinage	57
7.3.2	Facteurs de bobinage au rotor.....	57
7.3.3	Facteurs de bobinage au stator.....	57
7.3.4	Densité de courant.....	57
7.3.5	Facteur de remplissage	58
7.4	Éléments du schéma équivalent	58
8	CALCULS ET SIMULATIONS DU NOUVEAU BOBINAGE	60

8.1	Marche à vide du régulateur à induction	60
8.1.1	Variation de l'angle du rotor	60
8.1.2	Essai en position minimale et maximale	61
8.1.3	Comportement magnétique	62
8.2	Essai en court-circuit	62
8.3	Charge ohmique	63
8.3.1	Variation de l'angle	64
8.4	Charge inductive	66
8.4.1	Représentation du moteur électrique	66
8.4.2	Comparaison entre calcul analytique et simulation	67
8.4.3	Comportement du régulateur à induction	68
8.5	Utilisation du régulateur comme charge pour génératrice	69
9	REMISE À NEUF DU RÉGULATEUR À INDUCTION	72
9.1	Bobinage	72
9.2	Révision de la ventilation	76
9.3	Révision du réducteur	76
9.4	Montage de la machine	78
9.5	Temps de remise en état	79
10	ESSAI SUR LE RÉGULATEUR REMIS À NEUF	81
10.1	Préparations aux mesures	81
10.1.1	Mesures de continuité et d'isolation	82
10.2	Mesures à vide	82
10.2.1	Variation de l'angle du rotor à tension nominale	82
10.2.2	Mesures de puissance à vide	83
10.2.3	Détermination de X_h et R_{fer} du schéma équivalent	84
10.3	Mesures en court-circuit	85
10.3.1	Mesures de puissance en court-circuit	85
10.3.2	Mesures de thermique du régulateur à induction	88
10.4	Mesures avec charge ohmique	90
10.5	Mesures d'un moteur asynchrone de 90 [kW]	92
10.6	Courbe	95
10.7	Limite d'utilisation de la machine	95
11	REDRESSEUR POUR MACHINE À COURANT CONTINU	96
11.1	Cahier des charges	96
11.2	Première approche	96
11.3	Aide à la commutation (Snubber)	97
11.3.1	Descriptif du problème	98
11.3.2	Dimensionnement du système	98
11.4	Dimensionnement du redresseur	100
11.4.1	Composants	100

11.4.2	Schéma	101
11.4.3	Echauffement des semi-conducteurs	102
11.5	Simulation Maxwell.....	103
11.5.1	Schéma de simulation.....	103
11.5.2	Simulation à vide.....	104
11.5.3	Simulation avec machine à courant continu	105
11.6	Réalisation.....	108
11.6.1	Liste du matériel.....	108
11.6.2	Plan d'implantation.....	108
11.6.3	Photos du système	109
11.7	Essai du redresseur	110
11.7.1	Essai à vide.....	110
11.7.2	Charge ohmique	111
12	IMPLANTATION DU RÉGULATEUR À INDUCTION	113
12.1	Intégration de la machine à l'entreprise.....	113
12.1.1	Dimensionnement du câble d'alimentation.....	114
12.1.2	Protection contre les surintensités.....	115
12.1.3	Alimentation de la machine.....	115
12.2	Automatisation du système	115
12.3	Coût et taxation des services industriels	116
12.3.1	Système de taxation	116
12.3.2	Coût et impact d'un essai.....	117
13	CONCLUSIONS.....	118
14	REMERCIEMENTS.....	120
16	SOURCES	121
17	ANNEXES.....	121
18	LISTE DES SYMBOLES	122

1 INTRODUCTION

Le but du travail de diplôme est la réalisation d'un banc d'essai à tension variable pour tester les moteurs électriques avant leur livraison. Pour ce faire, il est prévu d'installer un régulateur à induction dans un dépôt annexe au local de test. Cette machine ayant été récupérée dans un ancien laboratoire, ses caractéristiques ne sont pas connues. Néanmoins, la machine devant être révisée, les grandeurs pourront être connues.

1.1 Cahier des charges

L'objectif final de ce projet est de pouvoir disposer d'une machine pouvant fournir une alimentation triphasée variable partant de zéro jusqu'à au moins 400 Volts.

Dans un premier temps, il s'agira de réaliser l'étude du système existant. Pour cela, la machine sera testée puis démontée afin de relever ses caractéristiques électriques et mécaniques.

La seconde partie du travail de diplôme consiste en l'étude du système. Le principe de fonctionnement de la machine devra être clairement défini. Ensuite, le régulateur à induction sera simulé par éléments finis et par un modèle analytique. Cela permettra de définir un nouveau bobinage pour la machine.

Pour finir, la machine sera bobinée à neuf et remontée. Des tests seront réalisés sur la machine finie, puis comparés aux résultats calculés.

1.2 Liste des tâches

Le travail est réparti entre le projet de semestre et le travail de diplôme. Le projet de semestre s'est déroulé sur vingt demi-journées en guise de préparation du travail de diplôme. Le travail de diplôme est réparti sur neuf semaines, du 13 mai 2013 au 12 juillet 2013.

Le projet de semestre a été axé sur les points suivants :

- ◆ définir le principe de fonctionnement de la machine, ainsi que les avantages et inconvénients ;
- ◆ définir les caractéristiques magnétiques et électriques de la machine actuelle ;
- ◆ effectuer et analyser des mesures sur le régulateur à induction initial.

Les objectifs du travail de diplôme sont listés ci-dessous :

- ◆ étude théorique, modélisation analytique et numérique de la machine ;
- ◆ définir un nouveau bobinage pour obtenir une tension de sortie proche de 0 [V] ;
- ◆ définir les limites d'essais en tenant compte des limites thermiques et magnétiques ;
- ◆ étudier et dimensionner l'alimentation et les protections ;
- ◆ étudier la possibilité de monter un redresseur triphasé à la sortie du régulateur ;
- ◆ étudier la commande à distance de la machine ;
- ◆ comparer l'étude théorique avec les mesures sur site.

1.3 Description de l'entreprise mandante

L'entreprise Valélectric Farner SA est une PME valaisanne domiciliée depuis plus de cinquante ans à St-Pierre-de-Clages. Sa principale activité est la réparation et la révision de machines électriques.

Une fois les machines électriques remises en état, elles sont testées électriquement avant leur livraison. L'entreprise teste actuellement les machines avec :

- ♦ une source à haute tension variable jusqu'à 80 [kV] afin de tester les transformateurs ;
- ♦ un autotransformateur pouvant fournir jusqu'à 150 [A] afin de tester les moteurs électriques ;
- ♦ un régulateur à induction pouvant fournir jusqu'à 20 [A] pour tester les petites machines.

Il y a vingt ans, Valélectric a récupéré, lors de la mise hors service d'un laboratoire, un régulateur à induction. Avec le développement de l'entreprise il devient nécessaire d'optimiser les installations d'essais et de disposer d'une seconde source de tension variable.

1.4 Procédures de réparation d'une machine électrique

Cette partie définit le cycle normal d'un moteur lors de sa réparation ou de sa révision. La grande majorité des machines sont des moteurs asynchrones.

Arrivée dans les ateliers, la machine est branchée au banc d'essai afin de relever les caractéristiques électriques à vide : tension, courant, sens et vibration.

Ensuite, la machine est démontée. Les parties bobinées sont plongées dans une solution dégraissante afin de se débarrasser des impuretés, puis elles sont placées au four à faible température afin d'évaporer les restes de la solution. Les machines dont le bobinage a brûlé sont bobinées à neuf et, si nécessaire, imprégnées et séchées.

Enfin, la machine est remontée, les roulements sont changés et le rotor est rééquilibré en cas de besoin.

Finalement, avant la livraison et la peinture, la machine est testée électriquement afin de vérifier son bon fonctionnement.

L'essai électrique d'entrée et de sortie se déroule de la même manière. La machine est branchée à l'autotransformateur. La machine est démarrée à tension réduite afin de constater d'éventuels défauts. Cela permet également de lancer doucement l'inertie du rotor et de limiter l'appel de courant du démarrage.

L'essai électrique ne dure généralement pas plus d'environ **cinq minutes**. Il est à noter que les fusibles en entrée du bâtiment sont de cent-vingt-cinq ampères. Le système ne devra pas consommer un courant plus important.

1.5 Analyse des forces et des faiblesses du système

Si la variation de tension se fait aujourd'hui couramment avec des convertisseurs AC/AC, l'utilisation d'un régulateur à induction offre certains avantages. En effet, la machine est déjà présente et de plus l'entreprise possède toutes les compétences si une réparation est nécessaire.

Le tableau suivant expose la liste des avantages et des défauts du régulateur à induction et d'un système électronique :

	Avantages	Désavantages
Electronique	Grande flexibilité (amplitude variable, forme variable, fréquence variable)	Courant et tension de sortie non sinusoïdal*
	Possibilité de faire directement du DC afin de tester un moteur DC	Grande dépendance vers le fabricant en cas de problème ou d'entretien
	Composant statique (pas de force en jeu)	Rejet d'harmonique : filtrage important
	Haut rendement	Durée de vie limitée dans le temps
	Peu volumineux	Fonctionnement compliqué (commutation, informatique, programmation...)
	A l'achat entre 10'000 et 20'000 pour une puissance entre 50 et 100 [kW]	
Régulateur à induction	Maintenance et réparation sur place : réactivité en cas de problèmes	Volumineux (chassis + grosse ventilation)
	Très peu d'entretien	Ancienne technologie
	Très longue durée de vie	Achat d'une machine neuve extrêmement cher
	Disponibilité de la machine	
	Tension et courant de sortie parfaitement sinusoïdal*	
	Fonctionnement "simple" et durable	

* La norme ATEX oblige l'utilisation de sources sinusoïdales pour l'essai des machines électriques EX

Tableau 1 : Tableau comparatif entre un régulateur à induction et un convertisseur de fréquence électronique

La machine et les compétences de transformations étant disponibles, le facteur prix ne rentre pas en compte. De plus, le régulateur à induction, de par sa construction robuste, peut facilement supporter des courts-circuits transitoires ou des surcharges momentanées.

2 THEORIE DU REGULATEUR A INDUCTION

Ce chapitre décrit le fonctionnement global du régulateur à induction afin de permettre une première approche du système.

2.1 Description mécanique

La machine se compose de trois parties principales (Figure 1) :

- ♦ la ventilation forcée ;
- ♦ le dispositif de rotation du rotor ;
- ♦ la machine électrique (rotor + stator).

La ventilation permet l'évacuation de la chaleur produite par les pertes du stator et du rotor. Elle est très importante car la machine est statique et ne peut pas s'auto-ventiler. L'angle du rotor qui permet de faire varier la tension de sortie se règle grâce à un moteur asynchrone fixé à un réducteur planétaire. Les positions extrêmes sont assurées par deux fins de course.

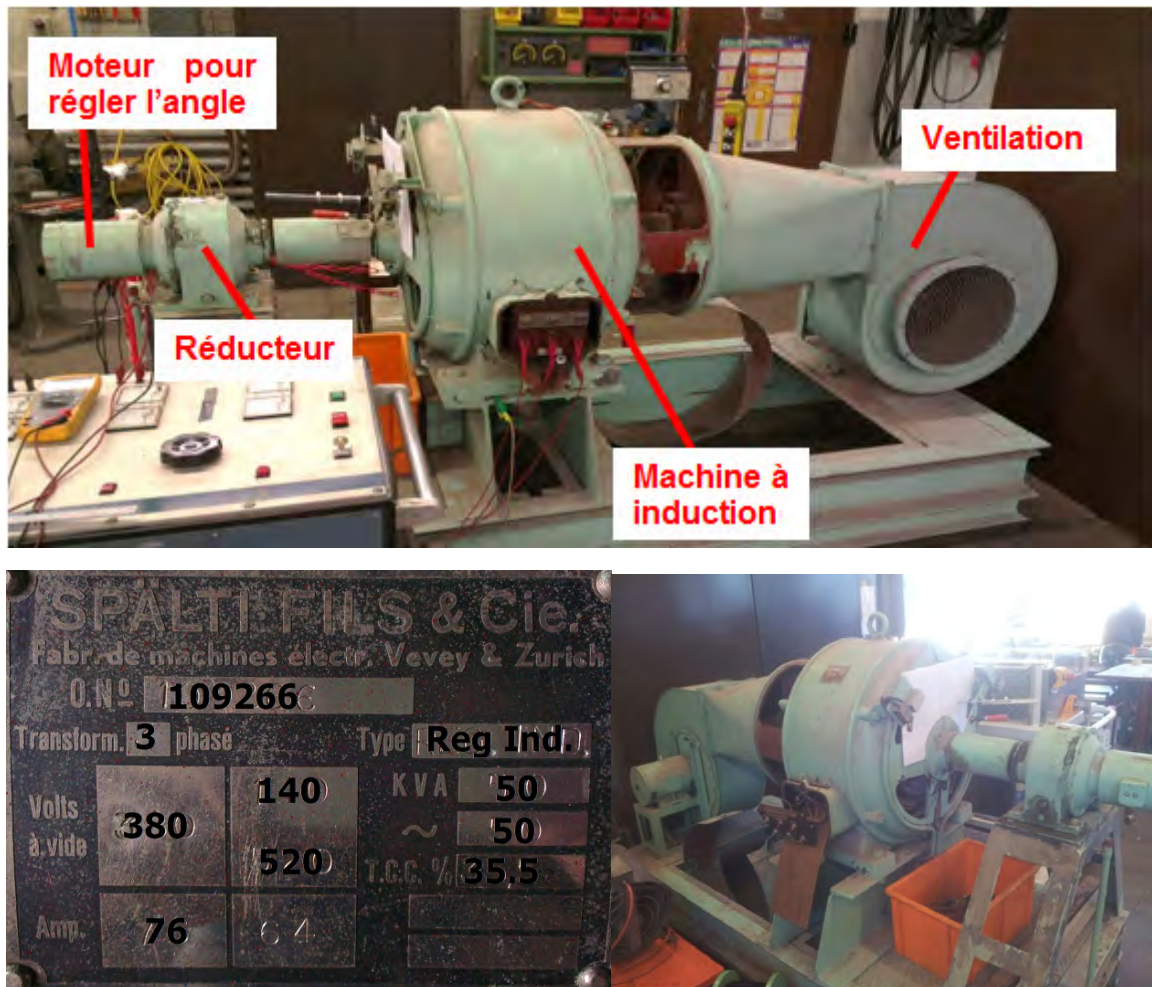


Figure 1 : Photos de l'installation avant les essais

Le corps de la machine est composé du rotor et du stator. Le régulateur à induction est équipé de deux plaques à borne. Sur la première, viennent se brancher le réseau et le pont étoile du stator. Sur la seconde, les connections du rotor y sont rapportées, parmi elles, la tension réglée.

La figure ci-dessous présente la situation :

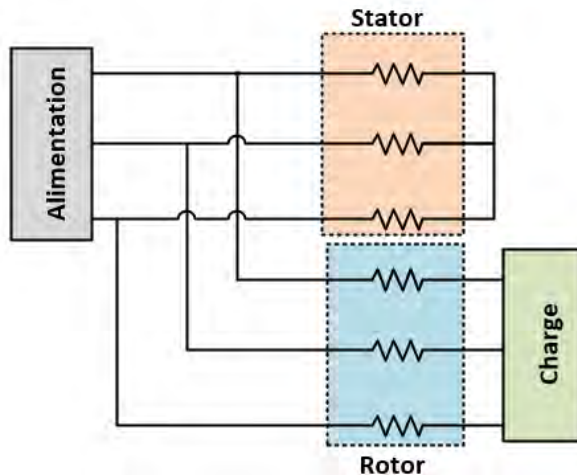


Figure 2 : Schéma de principe électrique du régulateur à induction

2.2 Descriptif de fonctionnement

Ce sous-chapitre permet une première approche du fonctionnement de la machine et explique le principe qui permet de faire varier la tension de sortie en fonction de l'angle du rotor.

Le régulateur à induction peut être vu comme un transformateur dont la tension de sortie est variable. Le stator de la machine représente le primaire du transformateur et le rotor le secondaire. En fonction du nombre de spires de ces deux éléments, une tension plus ou moins grande est induite au rotor. Le réseau électrique est ensuite connecté en série avec le rotor.

Il est possible de représenter de manière vectorielle le fonctionnement de la machine. La tension de phase du réseau est la référence, la tension induite dans le rotor présente un déphasage par rapport à celle du réseau. Ce déphasage dépend de la position angulaire du rotor. La tension induite est d'amplitude constante. L'angle du rotor et le déphasage électrique sont liés par le nombre de paires de pôles p de la machine en fonction de la relation suivante :

$$\alpha_{elec} = p \cdot \alpha_{mec}$$

La tension de sortie est l'addition vectorielle de la tension du réseau et de la tension induite.

L'image ci-dessous illustre les propos précédents :

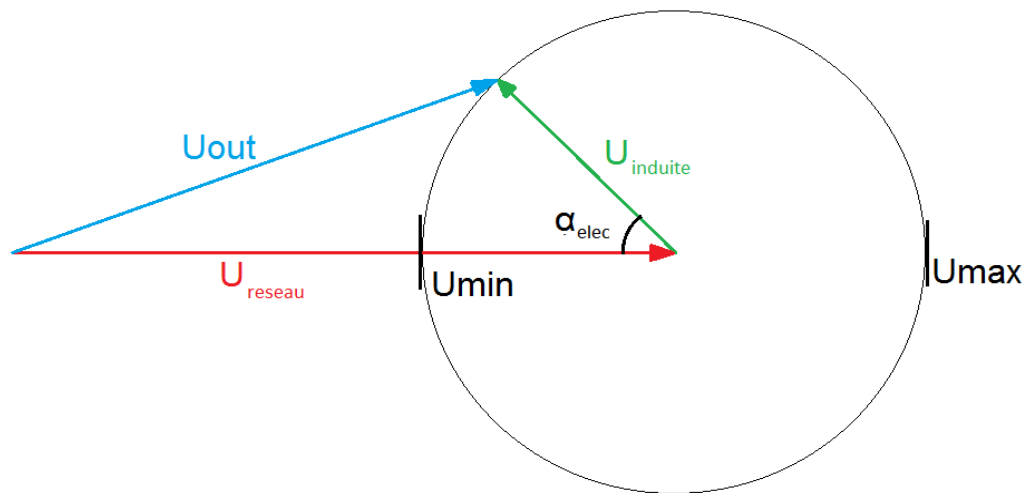


Figure 3 : Diagramme vectoriel d'un régulateur à induction

La tension du réseau, la tension induite et l'angle du rotor étant connus, il est possible de déterminer la tension de sortie à l'aide du théorème du cosinus :

$$U_{out} = \sqrt{U_{reseau}^2 + U_{induite}^2 - 2 \cdot U_{reseau} \cdot U_{induite} \cdot \cos(\alpha_{elec})}$$

La tension de sortie minimale est la tension du réseau moins la tension induite. La tension maximale est la tension induite plus la tension du réseau.

Les figures suivantes montrent l'évolution de la tension de sortie (en bleu) en fonction de l'angle de la tension induite (en vert) :

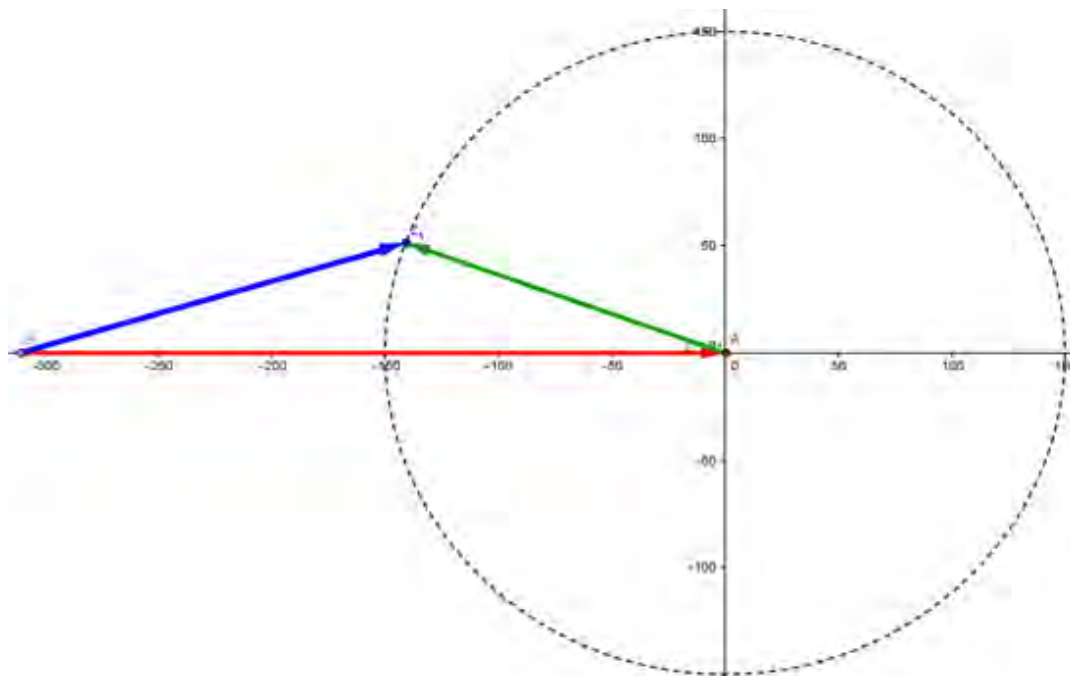


Figure 4 : Représentation par phaseurs des tensions, évolution des tensions en fonction de l'angle du rotor

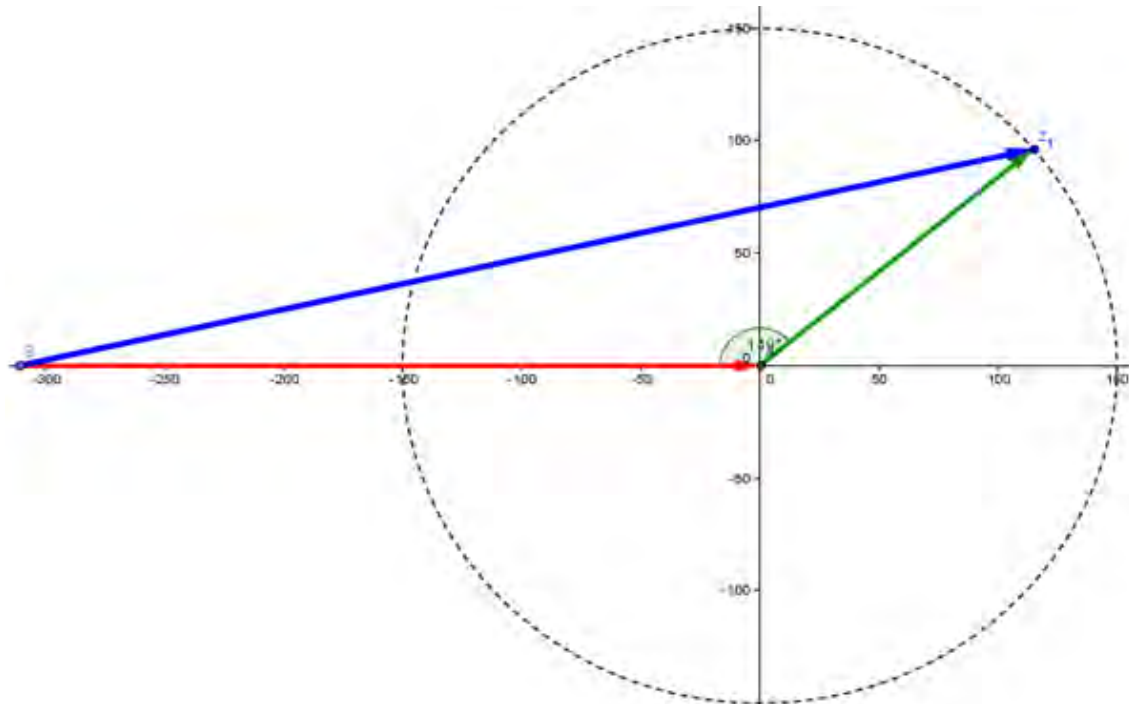


Figure 5 : Représentation par phaseurs des tensions, évolution des tensions en fonction de l'angle du rotor

Le but final est d'obtenir une tension minimale de zéro Volt. Cela implique que la tension induite soit égale à la tension du réseau afin qu'elles puissent s'annuler en position minimale.

La figure suivante indique la plage de la tension de sortie pour une tension induite égale à celle du réseau :

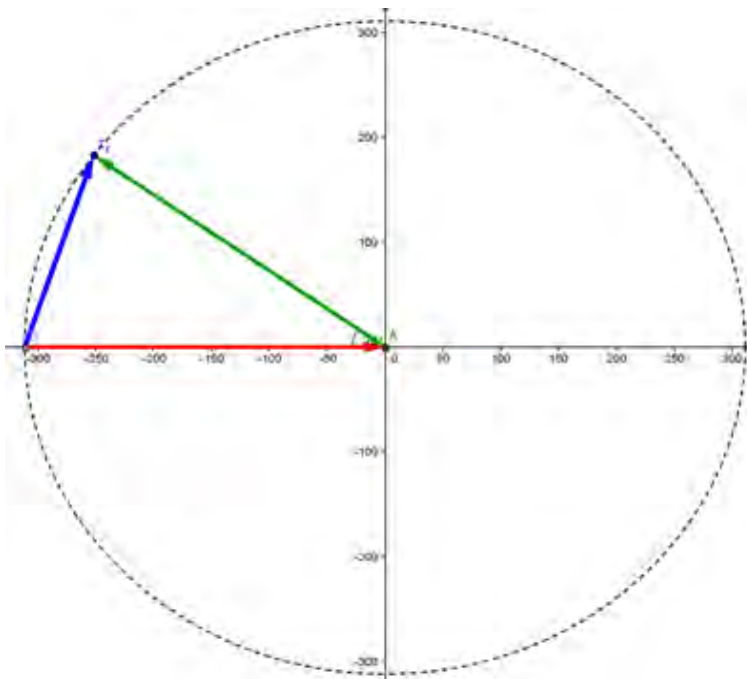


Figure 6 : Représentation par phaseurs pour une tension induite égale à la tension d'alimentation

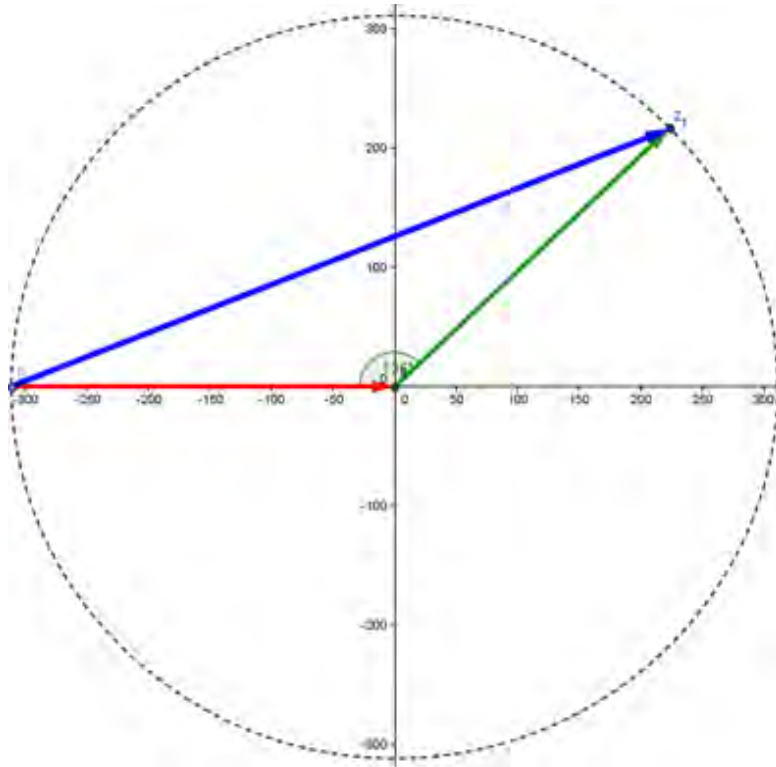


Figure 7 : Représentation par phaseurs pour une tension induite égale à la tension d'alimentation

Cette configuration permet certes d'obtenir une tension de sortie nulle mais elle permet aussi d'obtenir une tension de ligne de 800 V_{eff}. Il faudra prévoir un dispositif de limitation de la tension de sortie en verrouillant la course du rotor afin de ne pas détruire l'appareil à tester. Cela peut se réaliser très simplement en plaçant judicieusement des fins de course lors de l'automatisation de la machine.

2.3 Schéma équivalent du régulateur à induction

Un modèle analytique du régulateur à induction est proposé. Il se base sur le schéma équivalent du transformateur :

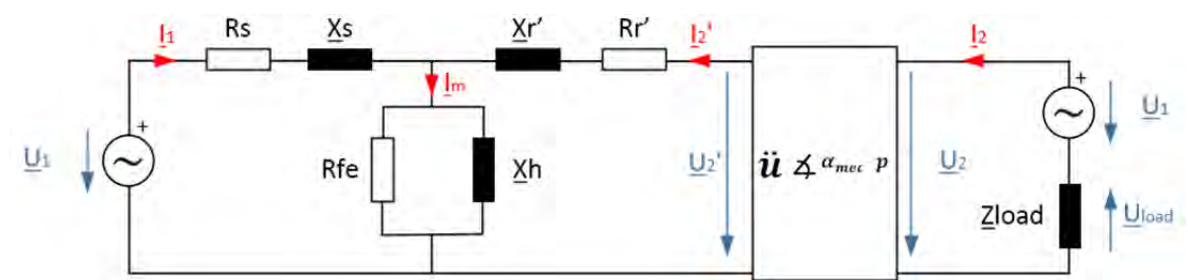


Figure 8 : Schéma équivalent du régulateur à induction

A la tension induite vient s'ajouter la tension d'alimentation. C'est pourquoi au secondaire une source de tension est mise en série avec la charge. Le déphasage de la tension induite est pris en compte dans le rapport de transformation en le considérant comme complexe. Le système est considéré comme linéaire la saturation du paquet de tôle n'est pas pris en compte.

Dans les sections suivantes, les calculs en lien avec le schéma équivalent et les manières d'en déterminer les composants sont expliqués.

2.3.1 Calcul du schéma équivalent par superposition

Afin d'effectuer le calcul des différentes grandeurs électriques, le principe de superposition est appliqué. Le courant en un point quelconque du circuit (respectivement la tension aux bornes de n'importe quel élément) s'obtient en effectuant les sommes algébriques des courants (respectivement tensions) dus à chaque source prise individuellement et agissant seule.

Le schéma de mesure est simplifié en fixant les éléments suivants :

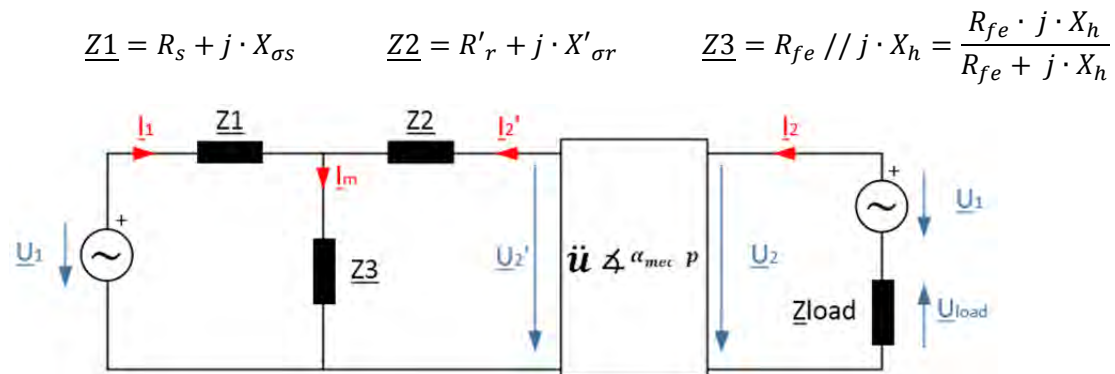


Figure 9 : Schéma équivalent du régulateur à induction simplifié

- **Superposition 1 : alimentation coté charge en court-circuit**

En court-circuitant la source de tension coté charge, le régulateur se comporte comme un transformateur. La tension aux bornes de la charge reste de même amplitude, elle va se déphaser par rapport à la tension du réseau en fonction de l'angle du rotor.

La machine peut être vue selon le schéma suivant :

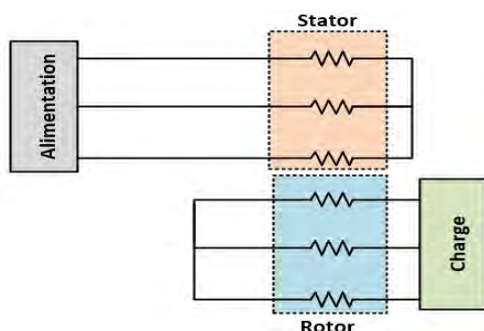


Figure 10 : Schéma de principe avec l'alimentation coté charge en court-circuit

Le schéma équivalent avec la charge rapportée est le suivant :

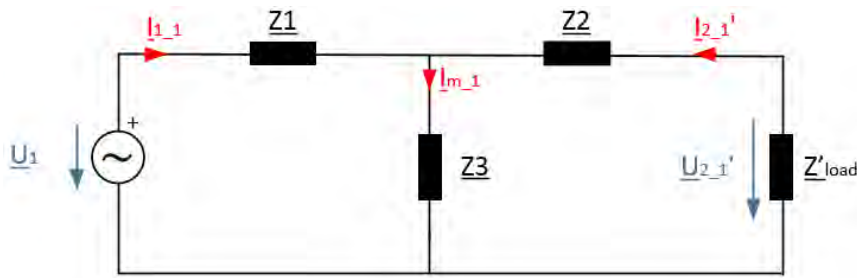


Figure 11 : Schéma équivalent du régulateur à induction, principe de superposition avec alimentation en court-circuit coté charge et charge rapportée au stator

Ci-dessous sont présentés les calculs relatifs à la figure précédente :

$$\underline{Z'_{load}} = \underline{Z_{load}} \cdot \underline{\ddot{u}}^2$$

$$\underline{Z_{equ_1}} = \underline{Z1} + \frac{\underline{Z3} \cdot (\underline{Z2} + \underline{Z'_{load}})}{\underline{Z3} + \underline{Z2} + \underline{Z'_{load}}}$$

Les différents courants se calculent de la manière suivante :

$$\underline{I_{1,1}} = \frac{\underline{U_1}}{\underline{Z_{equ_1}}}$$

$$\underline{I_{m,1}} = \underline{I_{1,1}} \cdot \frac{\underline{Z2} + \underline{Z'_{load}}}{\underline{Z2} + \underline{Z'_{load}} + \underline{Z3}}$$

$$\underline{I'_{2,1}} = -\underline{I_{1,1}} \cdot \frac{\underline{Z3}}{\underline{Z2} + \underline{Z'_{load}} + \underline{Z3}}$$

La tension rapportée au stator se calcule de la manière suivante :

$$\underline{U'_{2,1}} = -\underline{I'_{2,1}} \cdot \underline{Z'_{load}}$$

NB : Le signe moins pour le calcul des deux dernières valeurs permet de respecter les sens définis dans le schéma équivalent.

La tension est ensuite rapportée au rotor. La position de ce dernier a pour effet de déphaser la tension de sortie par rapport à la tension du réseau.

Le schéma suivant présente la situation :

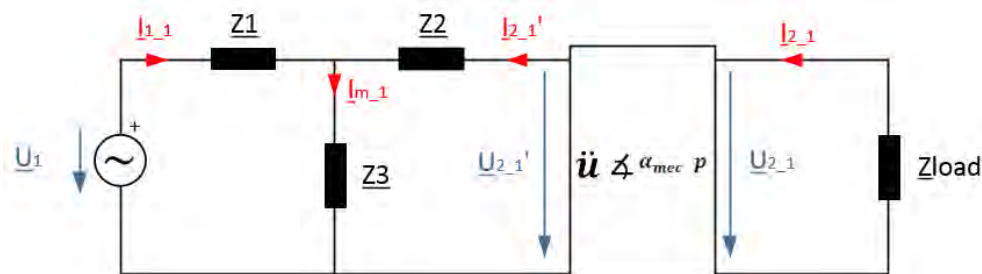


Figure 12 : Schéma équivalent du régulateur à induction, principe de superposition avec alimentation en court-circuit coté charge

La tension et le courant de la charge valent :

$$\underline{U}_{2_1} = \frac{\underline{U}'_{2_1}}{\underline{\ddot{u}} e^{j \cdot \alpha_{mec} \cdot p}}$$

$$\underline{I}_{2_1} = \frac{\underline{U}_{2_1}}{\underline{Z}_{load}}$$

- **Superposition 2 : alimentation coté réseau en court-circuit**

En court-circuitant la source de tension coté stator, la rotation du rotor n'a aucun impact sur la tension et le courant de la charge. L'angle du rotor déphase le courant et la tension induite au stator.

La machine peut être vue selon le schéma suivant :

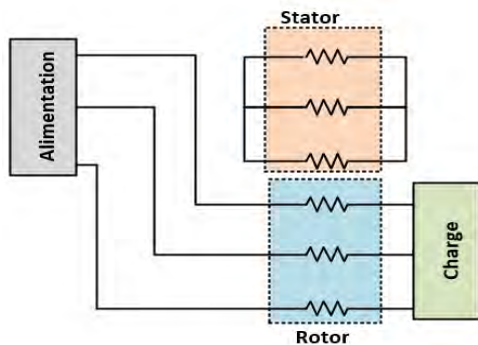


Figure 13 : Schéma de principe avec l'alimentation coté stator

En rapportant les composants au rotor, le schéma équivalent devient le suivant :

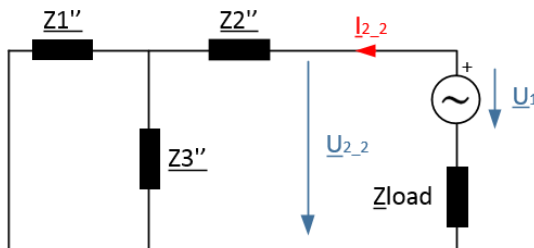


Figure 14 : Schéma équivalent du régulateur à induction, principe de superposition avec le stator en court-circuit et éléments rapportés au rotor

$$\underline{Z1''} = \frac{\underline{Z1}}{\underline{\ddot{u}}^2} \quad \underline{Z2''} = \frac{\underline{Z2}}{\underline{\ddot{u}}^2} \quad \underline{Z3''} = \frac{\underline{Z3}}{\underline{\ddot{u}}^2}$$

$$\underline{Z_{equ_2}} = \underline{Z_{load}} + \underline{Z2''} + \frac{\underline{Z3''} \cdot \underline{Z1''}}{\underline{Z3''} + \underline{Z1''}}$$

La tension \underline{U}_{2_2} et \underline{I}_{2_2} se calculent de la manière suivante :

$$\underline{I}_{2_2} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z_{equ_2}}}$$

$$\underline{U}_{2_2} = \underline{U}_1 - \underline{I}_{2_2} \cdot \underline{Z_{load}}$$

La tension est ensuite rapportée au stator. La position de ce dernier a pour effet de déphaser la tension et le courant au stator par rapport à la tension du réseau.

Le schéma suivant présente la situation :

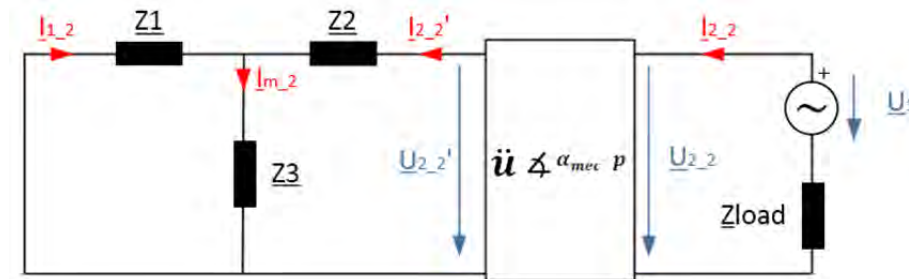


Figure 15 : Schéma équivalent du régulateur à induction, principe de superposition avec le stator en court-circuit

$$\underline{U}'_{2,2} = \underline{U}_{2,2} \cdot \ddot{u} e^{j\alpha_{mec} p}$$

Les courants rapportés au stator sont calculés :

$$\underline{Z}'_{equ,2} = \underline{Z}'_{load} + \underline{Z2} + \frac{\underline{Z3} \cdot \underline{Z1}}{\underline{Z3} + \underline{Z1}}$$

$$\underline{I}'_{2,2} = \frac{\underline{U}'_{2,2}}{\underline{Z}'_{equ,2}}$$

$$\underline{I}_{m,2} = \underline{I}'_{2,2} \cdot \frac{\underline{Z1}}{\underline{Z1} + \underline{Z3}}$$

$$\underline{I}_{1,2} = -\underline{I}'_{2,2} \cdot \frac{\underline{Z3}}{\underline{Z1} + \underline{Z3}}$$

- **Superposition : circuit final**

La valeur des courants et tensions correspond à l'addition des deux circuits de superposition :

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1,1} + \underline{I}_{1,2}$$

$$\underline{I}_m = \underline{I}_{m,1} + \underline{I}_{m,2}$$

$$\underline{I}'_2 = \underline{I}'_{2,1} + \underline{I}'_{2,2}$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{2,1} + \underline{I}_{2,2}$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{U}'_{2,1} + \underline{U}'_{2,2}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_{2,1} + \underline{U}_{2,2}$$

La tension sur la charge se calcule comme suit :

$$\underline{U}_{load} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$$

Le courant du réseau est l'addition du courant de sortie des deux sources de tension :

$$\underline{I}_{réseau} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2$$

2.3.2 Puissances et rendement du régulateur à induction

Tous les courants et tensions d'une phase étant connus, il est possible de déterminer la puissance des systèmes aux différents endroits :

- ♦ Puissance du réseau : $S_{\text{reseau}} = 3 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_{\text{reseau}}^*$;
- ♦ Puissance au stator : $S_{\text{stator}} = 3 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^*$;
- ♦ Puissance au rotor : $S_{\text{rotor}} = 3 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^*$;
- ♦ Puissance sur la charge : $S_{\text{charge}} = 3 \cdot \underline{U}_{\text{load}} \cdot \underline{I}_2^*$.

Une fois les puissances du régulateur à induction connues, le rendement de la machine se calcule de la manière suivante :

$$\eta = \frac{P_{\text{charge}}}{P_{\text{reseau}}} = \frac{\text{Re}(S_{\text{charge}})}{\text{Re}(S_{\text{reseau}})}$$

2.3.3 Echauffement adiabatique du bobinage

La caractéristique thermique de la machine n'étant pas connue et étant donné la courte durée d'un essai, l'échauffement du bobinage est calculé de manière adiabatique. C'est-à-dire que toute la chaleur reste dans le cuivre et qu'il n'y a aucun échange de chaleur avec l'environnement.

Il n'y a pas de conduction avec le fer, la convection avec l'air ambiant et le refroidissement qu'effectue le ventilateur n'est pas considéré. Il s'agit du pire cas possible, cela permet d'effectuer une première approche en considérant une marge importante.

Les facteurs impliquant une élévation de température dans la machine sont les pertes cuivre au stator et au rotor et les pertes fer. Elles se calculent avec le courant passant au stator (ou rotor) et la résistance du stator (ou rotor) :

$$P_{\text{cu_stator}} = 3 \cdot R_s \cdot I_{\text{stator}}^2 = 3 \cdot R_s \cdot I_1^2$$

$$P_{\text{cu_rotor}} = 3 \cdot R_r \cdot I_{\text{rotor}}^2 = 3 \cdot R_r \cdot I_2^2$$

Un échauffement adiabatique se calcule de la manière suivante :

$$m_{\text{cu}} \cdot c_{\text{cu}} \cdot \Delta\theta = P_{\text{cu}} \cdot t$$

Le temps d'essai admissible est :

$$t_{\text{adiabatique_stator}} = \frac{m_{\text{cu_stator}} \cdot c_{\text{cu}} \cdot \Delta\theta}{P_{\text{cu_stator}}} = \frac{m_{\text{cu_stator}} \cdot c_{\text{cu}} \cdot \Delta\theta}{3 \cdot R_s \cdot I_1^2}$$

$$t_{\text{adiabatique_rotor}} = \frac{m_{\text{cu_rotor}} \cdot c_{\text{cu}} \cdot \Delta\theta}{P_{\text{cu_rotor}}} = \frac{m_{\text{cu_rotor}} \cdot c_{\text{cu}} \cdot \Delta\theta}{3 \cdot R_r \cdot I_2^2}$$

L'équation finale dépend de :

- ♦ c_{cu} : chaleur massique du cuivre 380 [J/kg·K] ;
- ♦ m_{cu} et R : masse du cuivre et résistance du bobinage ;
- ♦ $\Delta\theta$: température maximale admissible. Dans le cas présent, la machine sera isolée en classe F cela implique une température maximale admissible de 155°. Le delta de température sera considéré de **130°** ;
- ♦ I : dépend de la charge et de l'angle du rotor.

N.B : Il est important de rappeler que le calcul se base sur un échauffement adiabatique et qu'il s'agit d'un cas extrême. Le temps pour un essai sur la machine ventilée sera nettement supérieur.

2.3.4 Calcul du couple de la machine

Le couple créé par le régulateur à induction provient de la puissance circulant au rotor. La différence de puissance active entre l'entrée et la sortie du régulateur à induction est à l'origine du couple de la machine.

Le schéma suivant illustre la situation :

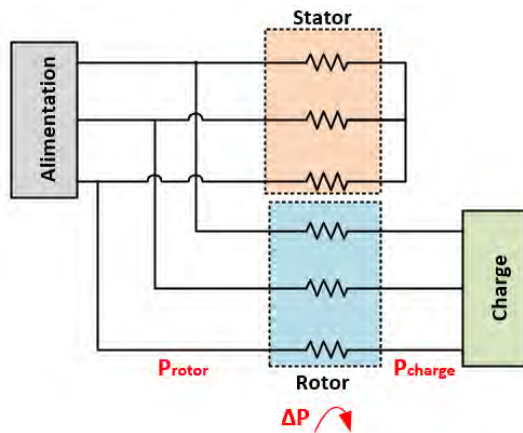


Figure 16: Schéma de principe du régulateur à induction

En supposant cela, le couple se calcule de la manière suivante :

$$M = \frac{P_{rotor} - P_{charge} - P_{cuivre_rotor}}{2 \cdot \pi \cdot n_s} = \frac{reel(S_{rotor}) - reel(S_{charge}) - R_r \cdot I_{rotor}^2}{2 \cdot \pi \cdot n_s}$$

La machine étant une quatre pôles : $n_s = 25$.

Les pertes cuivre au rotor ne contribuent pas au couple de la machine. Elles sont par conséquent déduites.

La méthode de calcul du couple de la machine sera vérifiée à l'aide de la simulation.

2.3.5 Script de calcul analytique et validation du schéma équivalent

Un script de calcul Matlab est réalisé [Annexe 1]. Il permet, à partir des éléments du schéma équivalent, de l'alimentation et de l'angle du rotor, de :

- ♦ calculer les grandeurs électriques (courant, tension);
- ♦ afficher les situations temporelles des courants et des tensions sur différents graphiques ;
- ♦ calculer les puissances (actives, réactives et apparentes) et le $\cos(\varphi)$ aux différents points importants ;
- ♦ calculer le rendement de la machine ;
- ♦ calculer une estimation du couple de la machine ;
- ♦ calculer le temps d'un essai en fonction de l'échauffement adiabatique.

Afin de vérifier la validité du schéma équivalent, un essai a été réalisé sur un transformateur triphasé dans la même configuration que le régulateur à induction. Le rapport de test est disponible à l'Annexe 2. Toutes les mesures ont été comparées avec les calculs du schéma équivalent et correspondent. Cela permet de valider le schéma équivalent pour les positions minimales et maximales.

2.3.6 Détermination des composants du schéma par mesure

Comme pour le transformateur, les éléments du schéma équivalent du régulateur à induction peuvent être déterminés par mesure. Pour cela, une mesure de la machine à vide et en court-circuit est nécessaire.

- **Mesure de continuité**

Afin de connaître la valeur des résistances cuivre par phase au rotor et au stator, une mesure ohmique est nécessaire. Pour cela, le pont étoile du stator est enlevé et aucune charge n'est reliée à la machine.

Cela permet de déterminer R_s et R_r .

- **Mesure à vide**

La mesure à vide permet de déterminer R_{fe} et X_h . Le schéma du transformateur à vide est le suivant :

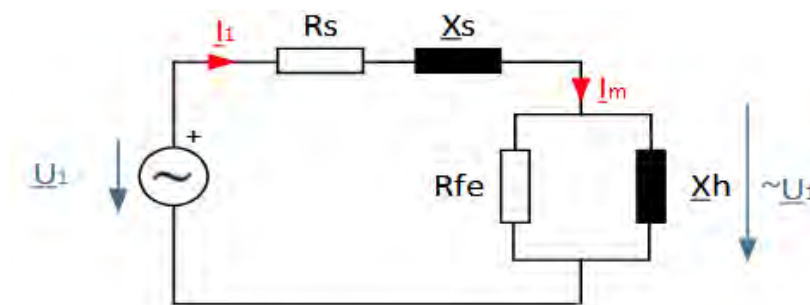


Figure 17 : Schéma équivalent à vide du régulateur à induction

Le courant d'une phase I_1 , la tension d'alimentation phase/neutre U_1 et la puissance d'une phase doivent au minimum être mesurés. L'angle de la machine n'intervient pas dans ce calcul.

Les composants se mesurent de la manière suivante :

$$R_{fe} \cong \frac{U_1^2}{(P_{phase} - R_1 \cdot I_1^2)}$$

$$X_h \cong \frac{U_1^2}{\sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 - (P_{phase} - R_1 \cdot I_1^2)^2}} = \frac{U_1^2}{Q_{Xh}}$$

N.B : La chute de tension sur X_s et R_s sont négligées car leurs valeurs sont très petites par rapport à la tension d'alimentation. Cela devra être vérifié lors des mesures.

La mesure à vide permet aussi de déterminer le rapport de transformation \ddot{u} de la machine. Pour cela une mesure de la tension de sortie en position minimale et maximale doit être réalisée :

La tension d'alimentation et le courant du secondaire doivent être rapportés au primaire. En position maximale, la tension est rapportée avec un angle de 180° électriques :

$$\underline{\ddot{u}} = \underline{\ddot{u}} \angle 180^\circ$$

$$U_2' = U_1 \cdot \underline{\ddot{u}} = -U_1 \cdot \underline{\ddot{u}}$$

$$I_2' = \frac{I_2}{\underline{\ddot{u}}} = -\frac{I_2}{\underline{\ddot{u}}}$$

Le courant rapporté I_2' et le courant I_1 doivent être identiques afin de pouvoir supprimer la branche magnétisante.

La tension sur les composants du schéma simplifié est :

$$U_{\text{comp}} = U_1 - U_2' = U_1 + U_1 \cdot \underline{\ddot{u}} = U_1 \cdot (1 + \underline{\ddot{u}})$$

Calcul de l'impédance de la ligne :

$$Z_{\text{comp}} = \frac{U_{\text{comp}}}{I_1}$$

Les résistances du schéma équivalent étant connues, la réactance du système peut être calculée :

$$X_\sigma = \sqrt{Z_{\text{comp}}^2 - (R_r' + R_s)^2}$$

Les impédances X_s et X_r' sont supposées identiques :

$$X_{\sigma s} \cong X_{\sigma r'} \cong \frac{X_\sigma}{2}$$

N.B : Cette hypothèse est couramment utilisée pour les transformateurs car le circuit magnétique est similaire pour le primaire et le secondaire. Dans le cas présent, le circuit magnétique au stator et rotor est complètement différent. Cette hypothèse sera quand même utilisée car dans cette situation, il est impossible de faire autrement.

2.3.7 Détermination des composants du schéma par calculs

A partir des dimensions de la machine et du type de bobinage, la majorité des composants du schéma équivalent peuvent être calculés.

- **Facteur de Carter**

Le facteur de Carter apporte une correction à l'entrefer en tenant compte de l'ouverture d'encoche et du pas d'encoche.

L'approximation du facteur de carter vaut [1] :

$$K_c = \frac{\tau_u}{\tau_u - b_2 \cdot \frac{\frac{b_2}{\delta}}{5 + \frac{b_2}{\delta}}}$$

- **Inductance de fuite des têtes de bobines**

L'inductance de fuite des têtes de bobines compose l'inductance de fuite totale. Elle dépend des dimensions de la machine, du type de bobinage et du nombre de spires par phases.

L'inductance de fuite des têtes de bobines vaut [1] :

$$L_w = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot q \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot l_w \cdot \lambda_w$$

Le facteur $l_w \cdot \lambda_w$ vaut [1] :

$$l_w \cdot \lambda_w = 2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{lew} + w_{ew} \cdot \lambda_w$$

Le facteur l_{ew} est la hauteur de la bobine (dans le même sens que les encoches). Le facteur w_{ew} est la longueur de la bobine, il est égal au pas polaire dans le cas d'un bobinage symétrique.

Les facteurs λ_{lew} et λ_w sont donnés en fonction du type de bobinage, ils seront considérés à 0.55 pour le premier et à 0.35 pour le second [1].

• Inductance de fuite des encoches

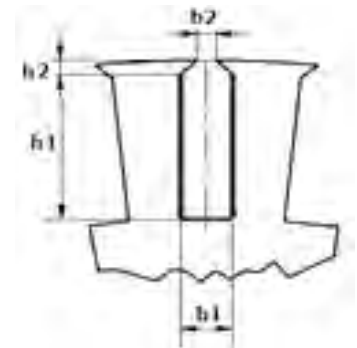
L'inductance de fuite des encoches contribue à l'inductance de fuite totale. Elle dépend de la géométrie de la dent et de la machine, du nombre de pôles et du nombre de spires de la phase.

L'inductance de fuite des encoches vaut [2] :

$$L_{\sigma N} = 16 \cdot \pi^2 \cdot \frac{N^2}{p \cdot q} \cdot l \cdot \lambda_{\sigma N} \cdot 10^{-7}$$

Le facteur $\lambda_{\sigma N}$ est donné par [2] :

$$\lambda_{\sigma N} = \frac{h_1}{3 \cdot b_1} + \frac{h_2}{b_2}$$



• Inductance de champ principal

L'inductance de champ principal est un élément important du schéma équivalent. Elle se calcule à partir des dimensions de la machine, du type de bobinage et du nombre de spires de la phase.

L'inductance de champ principal vaut [2] :

$$L_h = \frac{24}{\pi} \cdot \frac{(N \cdot k_{w1})^2}{p \cdot \delta \cdot K_c} \cdot l \cdot \tau_p \cdot 10^{-7}$$

Hypothèse de calcul : $\mu_{fer} = \infty$

• Résistance fer

La résistance fer de la machine est un élément difficile à calculer. Pour ce projet, elle sera déterminée grâce à l'essai de la machine actuelle à vide puis sera considérée comme constant.

Cette hypothèse peut être faite car la résistance fer est généralement bien plus grande que l'inductance de champ principal. Cela sera vérifié une fois la machine bobinée à neuf.

Il serait aussi possible de la négliger et de prendre en compte uniquement l'inductance de champ principal comme branche magnétisante [2].

• Approximation de la résistance cuivre

La résistance cuivre au stator et au rotor va fortement dépendre du type de bobinage (facteur de remplissage, nombre de conducteurs en parallèle, nombre de spires). Elle peut être estimée comme suit :

$$R = \frac{\rho_{cu} \cdot (l + w_{ew} + l_{ew})}{A_{cond}} \cdot \#_{encoche \text{ de la phase}} \cdot \frac{\#_{spires \text{ par encoche}}}{\#_{conducteur \text{ en parrallèle par spire}}}$$

La longueur considérée est la longueur du fer plus la longueur d'une tête de bobine. Le tout est multiplié par le nombre d'encoches par phase. Cela permet de prendre en compte la totalité de la bobine. Ensuite intervient le nombre de spires par encoche et le nombre de conducteurs en parallèle.

La conductivité électrique du cuivre est de $16,8 \cdot 10^{-9} [\Omega \text{ m}]$.

- **Approximation de la masse du cuivre**

La masse du cuivre peut être estimée de la manière suivante :

$$m_{cu} = \rho_{cu} \cdot (l_{active} + w_{ew} + l_{ew}) \cdot A_{cond} \cdot \#_{encoche \text{ de la phase}} \cdot \#_{conducteur \text{ par encoche}}$$

La masse volumique du cuivre vaut $8960 [\text{kg m}^{-3}]$.

2.3.8 Script de calcul des composants

Un script de calcul Matlab est réalisé. Il permet, à partir des dimensions de la machine et du nombre de spires au rotor et au stator, de calculer :

- ♦ le rapport de transformation ;
- ♦ le facteur de Carter ;
- ♦ l'inductance de champ principal ;
- ♦ l'inductance de fuite d'encoche ;
- ♦ l'inductance de fuite des têtes de bobines ;
- ♦ l'inductance de fuite totale.

Le script est disponible à l'Annexe 3 .

3 ESSAIS SUR LE SYSTEME INITIAL

Ce chapitre traite des essais réalisés sur le régulateur à induction dans sa configuration initiale. Quatre types d'essais sont réalisés : une mesure de continuité et d'isolation, une mesure en marche à vide, une mesure en court-circuit et une mesure en charge.

3.1 Définitions

Dans ce chapitre les termes ci-dessous seront utilisés afin de simplifier la lecture :

- ♦ Tension d'entrée := Tension d'alimentation électrique ;
- ♦ Tension de sortie := Tension de sortie réglée en fonction de l'angle du rotor ;
- ♦ Position minimale := Position où la tension de sortie est à sa valeur minimale ;
- ♦ Position maximale := Position où la tension de sortie est à sa valeur maximale.

3.2 Personnes présentes et appareils de mesures

Les essais ont été réalisés dans les ateliers de Valélectric. Les personnes ayant participé aux essais du régulateur à induction sont :

- ♦ Dr. Chevailler Samuel : *Professeur HES* 
- ♦ Farner Christian : *Mandant* 
- ♦ Farner Lucas : *Diplômant*

Ci-dessous la liste des instruments de mesures utilisés pour les tests :

Description	Marque	Type
Oscilloscope	Tektronix	TDS 3054
Voltmètre	Fluke	115
Wattmètre	Fluke	434
Pince ampéremétrique	Fluke	375
Caméra thermique	Flir	E30bx

Tableau 2 : Liste des appareils de mesures

3.3 Préparation à l'essai

Afin de pouvoir mesurer l'angle de position du rotor, un disque gradué est placé sur le stator. Le rotor est quant à lui équipé d'une tige permettant d'indiquer la position. Pour des raisons pratiques, le disque est composé de 54 graduations tous les 2.5° permettant une lecture entre 0° et 135° mécanique.

La lecture de la position se fera de manière visuelle. La précision est suffisante pour mesurer la valeur de la tension de sortie en fonction de l'angle du rotor.

La figure suivante présente des photos du dispositif de mesure de l'angle :

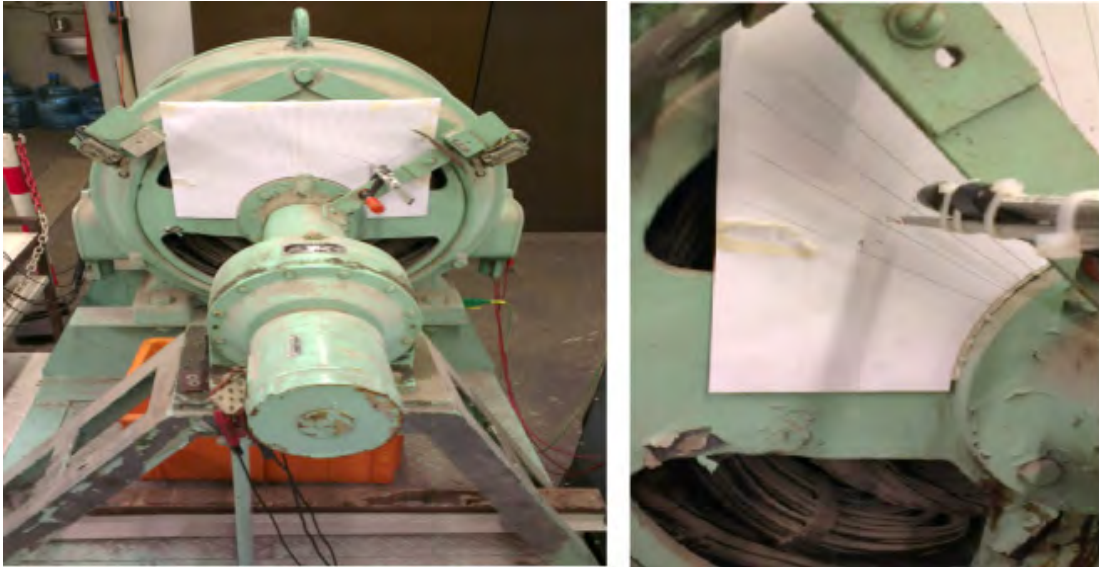


Figure 21 : Mesures de l'angle du rotor

3.4 Mesures ohmiques

Ce sous-chapitre traite des mesures ohmiques réalisées sur la machine. Une mesure de continuité permet de déterminer la valeur ohmique des enroulements ainsi que le schéma de câblage. Une mesure d'isolation permet d'effectuer un essai sans crainte de claquage.

3.4.1 Schéma de continuité

Les bornes de machine sont mesurées au miliohmètre afin de définir le câblage du régulateur à induction. Le pont étoile du stator est enlevé afin de pouvoir effectuer des mesures correctes.

Le schéma de câblage de la machine est présenté à la figure suivante :

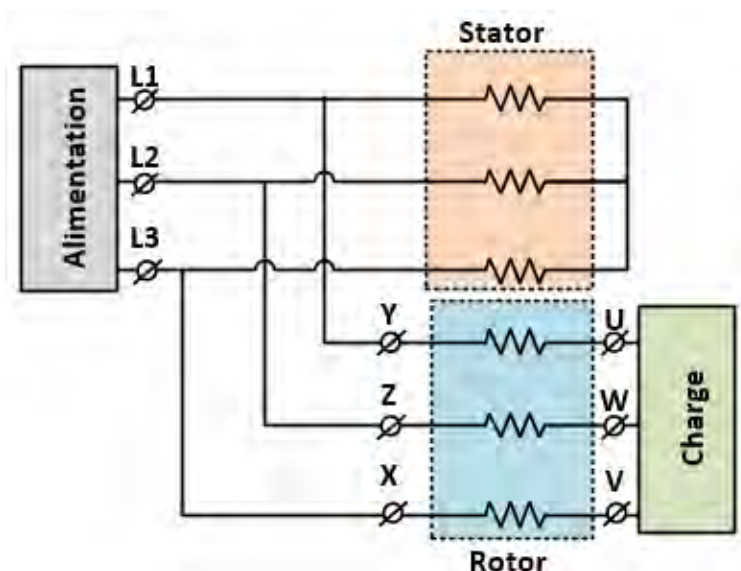


Figure 22 : Schéma de câblage du régulateur à induction

Une mesure au miliohmètre a été effectuée afin de connaître la résistance cuivre des enroulements. Le tableau suivant présente les résultats :

	Stator [mOhm]	Rotor [mOhm]
Phase 1	51	92
Phase 2	52	91
Phase 3	51	106

Tableau 3 : Mesures des résistances des enroulements rotoriques et statoriques

La machine datant des années 1960, les isolations sont très fragiles et cassantes. Le simple fait de démonter les plaques à bornes a créé un contact entre une phase et le châssis. Afin de réaliser les essais, les câbles blessés ont été isolés à l'aide de NOMEX® :



Figure 23 : Réparation des câbles blessés

3.4.2 Mesure d'isolation

Une mesure d'isolation entre le châssis et les trois phases est faite. Une isolation d'environ 31 [MΩ] est trouvée. Cela permet d'effectuer les tests sans crainte de claquage.

3.5 Marche à vide

Cette partie présente les essais réalisés sur le régulateur à induction à vide.

3.5.1 Variation de la tension d'entrée

Comme première mesure, le rotor est placé en butée (au maximum puis au minimum).

La tension du réseau est variée. La tension de sortie ainsi que le courant sont relevés. Les résultats se trouvent dans le tableau ci-dessous :

Tension réseau [V]	Tension maximale [V]	Tension minimale [V]	Courant [A]	Rapport réseau / maximum	Rapport réseau / minimum
405	608	197,6	10,9	1,501	0,488
400	601	195,6	10,8	1,503	0,489
390	587	190,7	10,5	1,505	0,489
380	572	185,5	10,2	1,505	0,488
370	556	180	9,9	1,503	0,486
350	526	170	9,4	1,503	0,486
300	452	146,6	8	1,507	0,489
200	299	97,8	5,3	1,495	0,489
150	224	73,3	4	1,493	0,489
100	155,7	49	2,9	1,557	0,490
Moyenne				1,507	0,488

N.B : Les tensions sont mesurées entre deux phases (tension de ligne)

Tableau 4 : Evolutions des tensions de sortie minimale et maximale en fonction de la tension d'alimentation

Le rapport entre tension du réseau et tension de sortie est relativement stable. Pour le rotor en butée maximale, un rapport moyen de 1.507 est trouvé. Pour le rotor en butée minimale, un rapport moyen d'environ 0.488 est trouvé. Le régulateur à induction se comporte de manière linéaire en fonction de la tension d'entrée.

La machine dans cette configuration permet de faire varier la tension de ligne de sortie entre 200 [V] et 600 [V]. La tension de sortie en position minimale est trop haute pour utiliser le régulateur à induction comme banc de test pour les machines électriques.

Pour la tension nominale, le tableau ci-dessous est réalisé :

Phase U-W	
Tension maximum [V]	574
Tension minimal [V]	185,4
Tension induite [V]	194,3
Tension du réseau [V]	379,7

Tableau 5 : Paramètres du diagramme des phaseurs à tension nominale

Avec le tableau ci-dessus, le rapport de transformation est calculé comme suit :

$$\dot{u} = \frac{U_{\text{reseau}}}{U_{\text{induit}}} = \frac{373.7}{194.3} = 1.954$$

Le facteur \dot{u} sera comparé avec le rapport de nombre de spires une fois connu. Ces deux facteurs doivent correspondre.

3.5.2 Variation de l'angle à tension nominale

Le second test consiste à faire varier l'angle du rotor et de relever l'évolution de la tension de sortie. L'essai est réalisé à tension d'alimentation nominale de 380 [V].

La tension de sortie est mesurée en fonction de l'angle du rotor. Aux pages suivantes sont présentés le tableau des résultats complets ainsi qu'un graphique afin de pouvoir visualiser l'ensemble. Le tableau comporte la mesure de tension entre chaque phase, l'application du calcul théorique de la section 2.2 et la comparaison entre le calcul et la mesure.

Chiffre disque	Angle du rotor [°]	Tension mesurée U-W [V]	Tension mesurée W-V [V]	Tension mesurée U-V [V]	Tension calculée [V]	Erreur absolue [V]	Erreur relative [%]
27	123,75	494	495,6	496	488,25	5,75	1,16
26,5	121,25	507	508	509	500,06	6,94	1,37
26	118,75	517	518	519	511,08	5,92	1,14
25,5	116,25	526	527	528	521,29	4,71	0,89
25	113,75	533	534	535,6	530,67	2,33	0,44
24,5	111,25	542	543	544	539,18	2,82	0,52
24	108,75	547	548	549	546,80	0,20	0,04
23,5	106,25	554	555	556	553,51	0,49	0,09
23	103,75	558	559	560	559,29	1,29	0,23
22,5	101,25	564	565	566	564,13	0,13	0,02
22	98,75	569	570	571	568,02	0,98	0,17
21,5	96,25	571	572	573	570,95	0,05	0,01
21	93,75	573	574	575	572,90	0,10	0,02
20,5	91,25	573	574	575	573,88	0,88	0,15
20,25	90	574	575	576	574,00	0,00	0,00
20	88,75	574	575	576	573,88	0,12	0,02
19,5	86,25	572	573	574	572,90	0,90	0,16
19	83,75	568	569	570	570,95	2,95	0,52
18,5	81,25	564	565	566	568,02	4,02	0,71
18	78,75	560	561	562	564,13	4,13	0,74
17,5	76,25	552	555	556	559,29	7,29	1,32
17	73,75	546	548	549	553,51	7,51	1,37
16,5	71,25	537	540	540	546,80	9,80	1,82
16	68,75	530	532	532	539,18	9,18	1,73
15,5	66,25	523	526	526	530,67	7,67	1,47
15	63,75	514	517	517	521,29	7,29	1,42
14,5	61,25	503	506	506	511,08	8,08	1,61
14	58,75	495	497	497	500,06	5,06	1,02
13,5	56,25	480	482	482	488,25	8,25	1,72
13	53,75	469	471	471	475,70	6,70	1,43
12,5	51,25	455	458	458	462,45	7,45	1,64
12	48,75	441	444	444	448,54	7,54	1,71
11,5	46,25	425	428	428	434,01	9,01	2,12
11	43,75	411	413	413	418,91	7,91	1,93
10,5	41,25	394	396	396	403,32	9,32	2,36
10	38,75	378	380	380	387,28	9,28	2,46
9,5	36,25	362	364	364	370,88	8,88	2,45
9	33,75	346	349	349	354,20	8,20	2,37
8,5	31,25	332	334	334	337,33	5,33	1,61
8	28,75	313	315	315	320,38	7,38	2,36
7,5	26,25	292	294	294	303,48	11,48	3,93
7	23,75	279	281	281	286,78	7,78	2,79
6,5	21,25	268	268	268	270,44	2,44	0,91
6	18,75	250	251	251	254,68	4,68	1,87
5,5	16,25	236	238	238	239,75	3,75	1,59
5	13,75	223	224	224	225,93	2,93	1,31
4,5	11,25	211	212	212	213,55	2,55	1,21
4	8,75	200	202	202	202,98	2,98	1,49
3,5	6,25	195	196	196	194,60	0,40	0,20
3	3,75	189	190	190	188,77	0,23	0,12
2,5	1,25	186	186	186	185,78	0,22	0,12
2,25	0	185,4	186	186	185,40	0,00	0,00
2	-1,25	186	186	196	185,78	0,22	0,12
1,5	-3,75	188	189	198	188,77	0,77	0,41
1	-6,25	194	195	195	194,60	0,60	0,31

Tableau 6 : Tableau des résultats pour l'essai de la variation de l'angle à vide

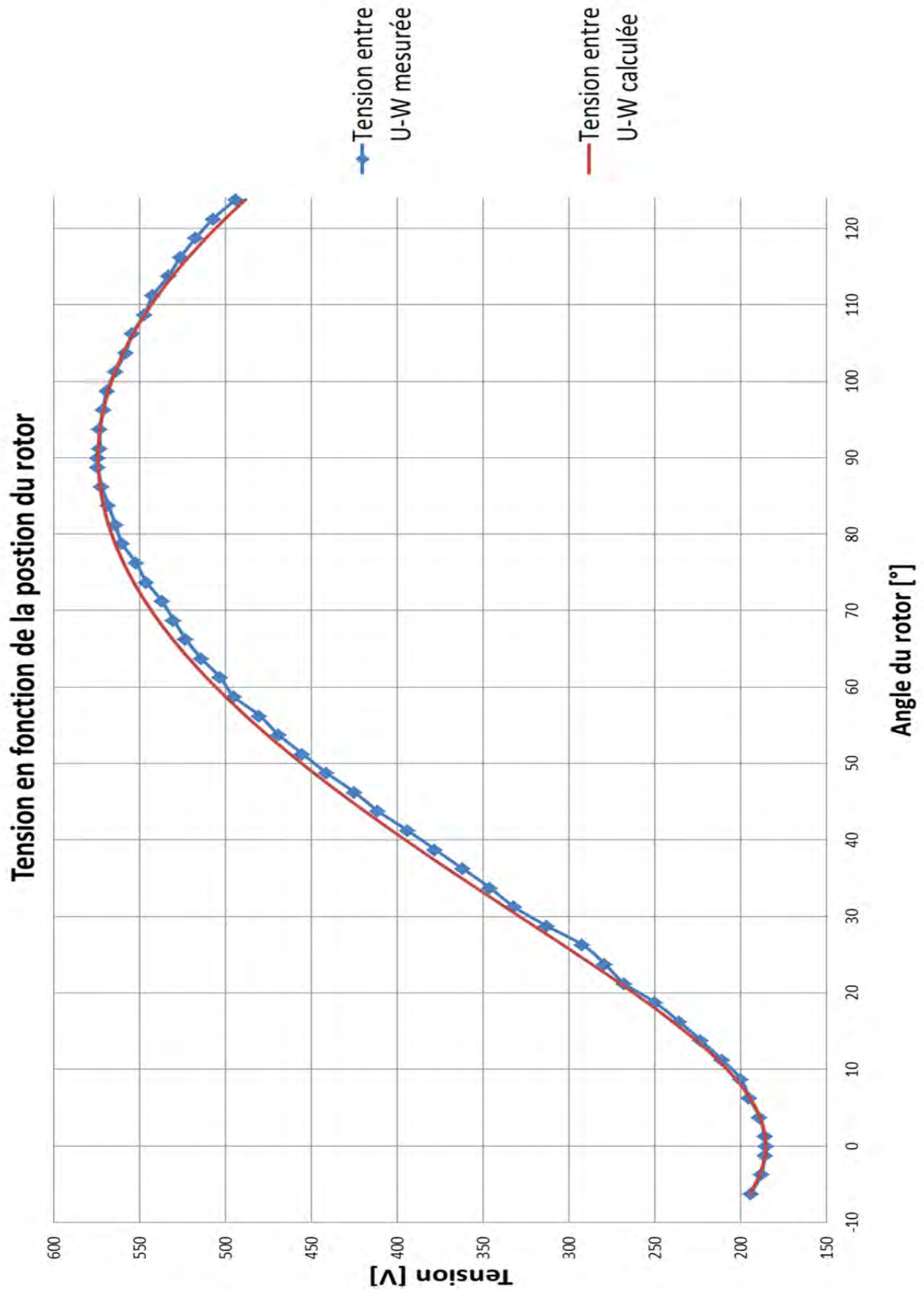


Figure 24 : Graphique des résultats de la tension de sortie à vide en fonction de l'angle

Le résultat de l'essai et la valeur calculée correspondent bien. Il y a une erreur moyenne de 1.1% soit une tension 4.4 [V], avec une erreur maximale de 3.9%, soit une tension de 11.5 [V]. La tension de sortie en fonction de l'angle du rotor se comporte bien comme supposé.

Il est important de rappeler que la mesure de l'angle n'est pas très précise car elle est relevée visuellement.

3.5.3 Formes des tensions

Une mesure à l'oscilloscope de la machine à vide est réalisée afin de visualiser l'allure des tensions et du courant. Les canaux de mesure sont les suivants :

- ♦ Canal 1 (en jaune) : tension d'entrée entre L1 et L3 ;
- ♦ Canal 2 (en bleu) : tension de sortie entre U et V ;
- ♦ Canal 3 (en violet) : tension sur une bobine du rotor entre Y et U ;
- ♦ Canal 4 (en vert) : courant d'entrée de la phase L1.

Ci-dessous est exposé le schéma de la mesure :

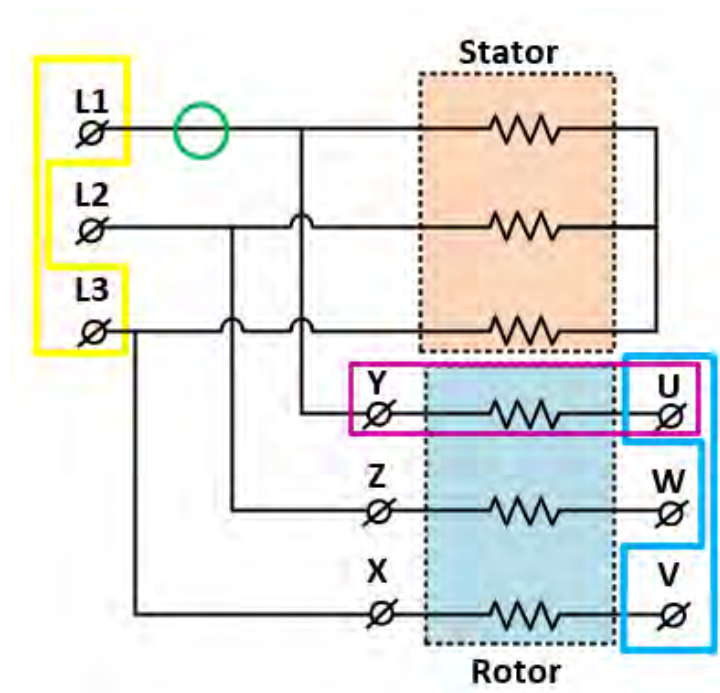


Figure 25 : Schéma et représentation des phaseurs de la mesure

Dans un premier temps, l'appareil est branché à la tension nominale de 380 [V]. Une acquisition est faite en position minimale et à position maximale.

A la figure suivante sont présentées les courbes en position minimale :

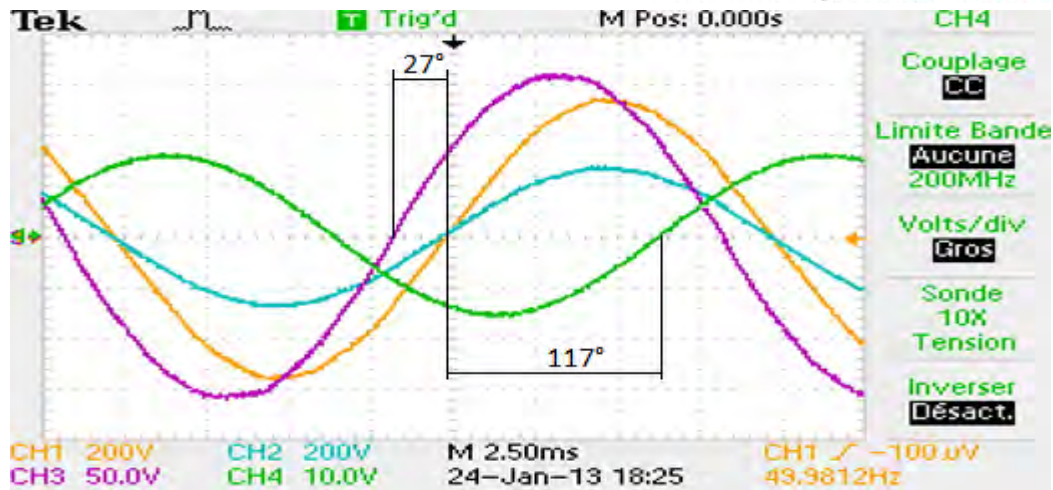


Figure 26 : Ecran de l'oscilloscope rotor en position minimale, tension alimentation 380 [V]

Ci-dessous sont présentées les courbes en position maximale :

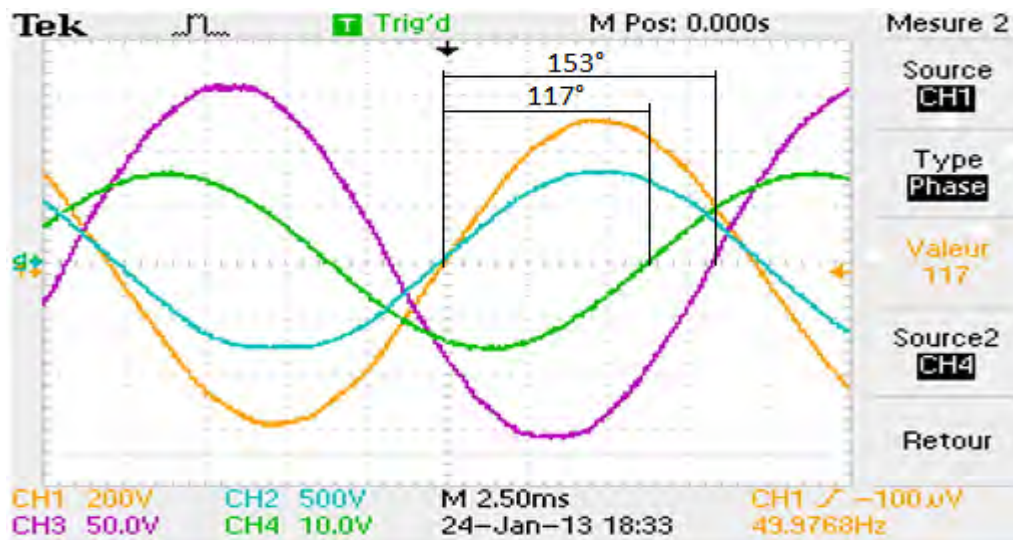


Figure 27 : Ecran de l'oscilloscope rotor en position maximale, tension d'alimentation 380 [V]

En déplaçant le rotor de sa position minimale à maximale, la tension d'entrée (jaune) reste fixe, la tension de sortie (en bleu) reste en phase avec celle d'entrée mais augmente. La tension de phase du rotor (en violet) se déplace vers la gauche en fonction de l'angle du rotor, sa valeur reste fixe.

Ci-dessous est présenté le tableau des résultats des deux figures précédentes :

		Tension d'entrée (jaune) [V]	Tension du rotor (en violet) [V]	Tension de sortie (bleu) [V]	Courant (en vert) [A]
Pos. Min	Crête	540	150	280	15
	Rms	380	106	198	11
Pos. Max	Crête	540	150	800	15
	Rms	380	106	566	11

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des résultats de l'oscilloscope

A la figure suivante les tensions de la machine sont représentées. La maille des tensions en position maximale et minimale est effectuée afin de clarifier la situation :

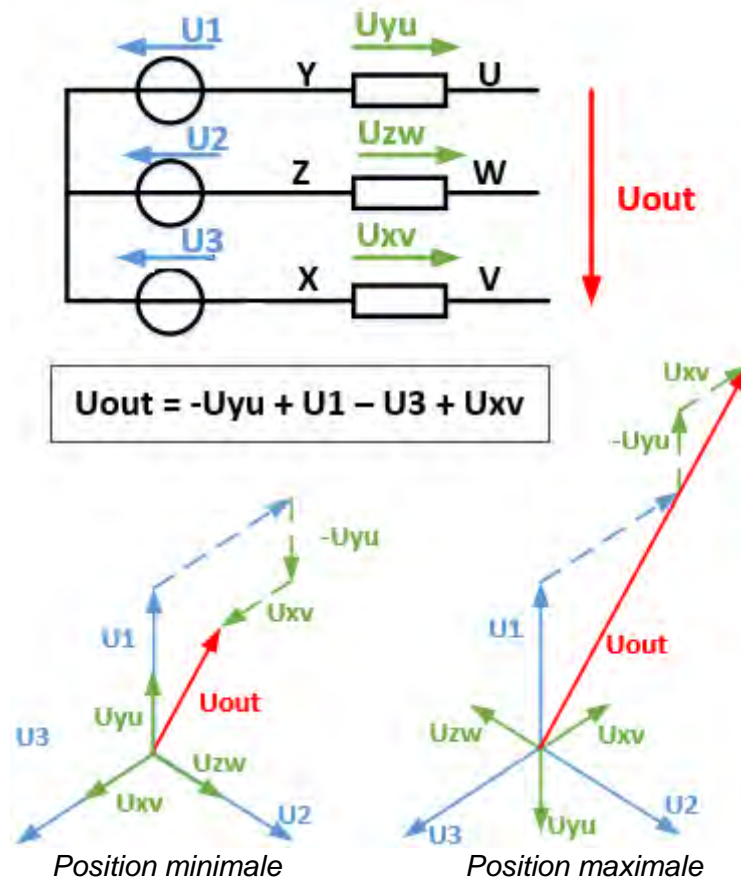


Figure 28 : Explicatif de l'angle des tensions induites

Entre la tension de ligne en entrée et le courant de phase, il y a un déphasage de 117° (courant en retard). Le système étant inductif, le courant a un retard de 90° sur la tension de phase et la tension de ligne a une avance de 30° sur celle de phase. Cela donne au final un retard de 120° du courant sur la tension de ligne. La différence entre les 117° mesurés et les 120° de la théorie s'explique par le fait que les résistances cuivre ne sont pas prises en compte.

La figure suivante présente brièvement la situation :



Figure 29 : Représentation par phaseur des courants et tensions

3.5.4 Puissance à vide

Un second test à tension réduite de 200[V] est effectué afin de relever la puissance à vide du régulateur à induction. Le test est réalisé avec le rotor en position maximale. Ci-dessous est présenté le relevé de l'oscilloscope :

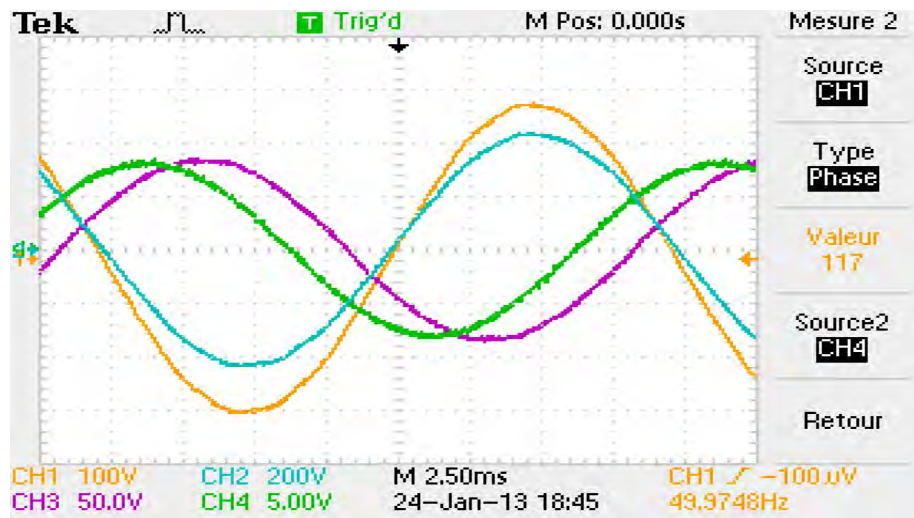


Figure 30 : Mesures à l'oscilloscope à tension d'entrée de 200 Volts

Les valeurs mesurées sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tension moyenne ligne[V]	Courant [A]	S [VA]	Q [Var]	P [W]	cos(phi) [-]
200	5,4	1872	1860	210	0,1

Tableau 8 : Tableau de la puissance à vide pour une tension d'alimentation de 200 Volts

3.5.5 Détermination de X_h et R_{fer} du schéma équivalent

Les mesures de puissance permettent de déterminer R_{fe} et X_h . Pour rappel le schéma équivalent du transformateur à vide est le suivant :

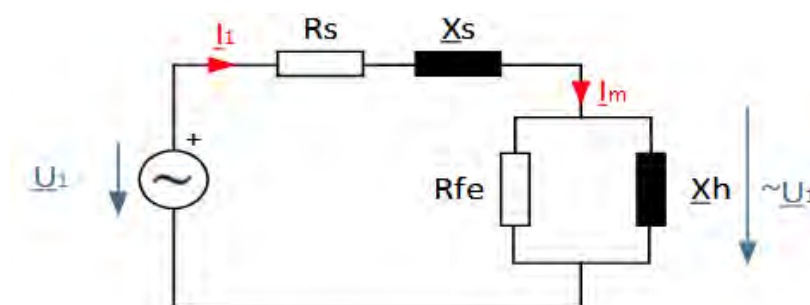


Figure 31 : Schéma équivalent à vide du régulateur à induction

Selon le tableau précédent, les valeurs suivantes ont été mesurées :

$$I_1 = 5.4 \text{ [A]} \quad U_1 = 115.5 \text{ [V]} \quad P_{phase} = 70 \text{ [W]} \quad Q_{phase} = 620 \text{ [Var]} \quad S_{phase} = 624 \text{ [VA]}$$

$$R_{fe} \cong \frac{U_1^2}{(P_{phase} - R_1 \cdot I_1^2)} = \frac{115.3^2}{(70 - 0.052 \cdot 5.4^2)} = 195 \text{ [\Omega]}$$

$$X_h \cong \frac{U_1^2}{Q_{phase}} = \frac{115.3^2}{620} = 21.5 [\Omega]$$

3.6 Essai en court-circuit

Un essai en court-circuit est réalisé avec le rotor en position maximale. Le régulateur à induction est branché sur un autotransformateur pouvant délivrer jusqu'à 100 [A].

Les puissances appliquées en entrée sont mesurées à l'aide d'un wattmètre triphasé. Les formes du courant en entrée et sur le court-circuit sont relevées à l'aide de l'oscilloscope.

Les canaux suivants sont définis :

- ♦ Canal 3 (**en violet**) : courant au rotor (conducteur U avant le court-circuit) ;
- ♦ Canal 4 (**en vert**) : courant d'alimentation de la phase L1.

3.6.1 Résultats

Les résultats des mesures sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Le premier contient les informations sur les puissances des trois phases. Le second montre seulement le résultat de la phase L1. Cela a semblé être judicieux car le système n'est pas parfaitement symétrique.

La tension a été augmentée progressivement, les points intermédiaires lors de la montée ont également été relevés :

Tension _{moyenne} ligne[V]	Courant [A]	S [VA]	Q [Var]	P [W]	cos(phi) [-]
12,7	33,6	500	440	190	0,39
14,5	58,5	1500	1360	560	0,38
17,1	66,6	2000	1850	700	0,35
17,5	70	2130	1970	760	0,36

Tableau 9 : Tableau des puissances triphasées lors de l'essai en court-circuit

Tension [V]	Courant [A]	S [VA]	Q [Var]	P [W]	cos(phi) [-]
4	33,6	130	110	80	0,6
8,7	58,5	510	440	260	0,5
10,2	66,3	680	600	310	0,46
10,5	68,7	720	650	330	0,36

Tableau 10 : Tableau des puissances de la phase L1 lors de l'essai en court-circuit

N.B : Les photos de l'écran du wattmètre pour chaque point sont disponibles sur informatique. Elles ne sont pas présentées dans le rapport.

A la figure suivante sont présentés le courant de sortie et le courant du réseau pour une tension de phase d'entrée de 10.5 [V] :

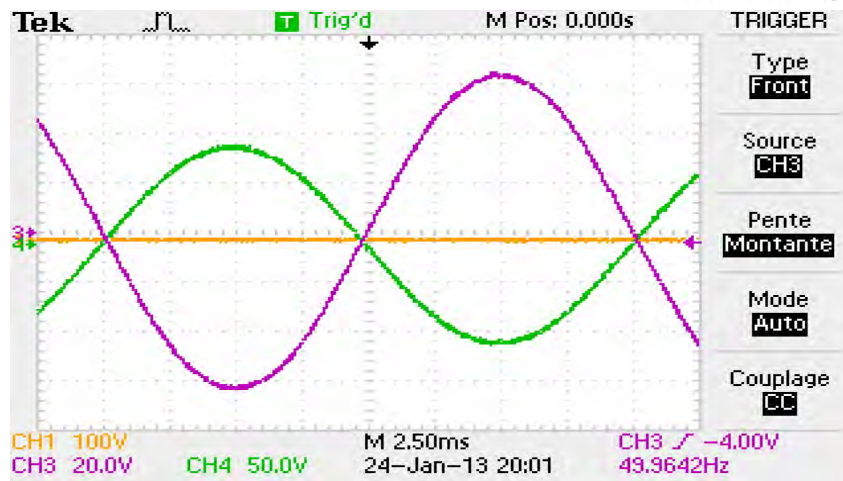


Figure 32 : Image des courants d'entrée (vert) et sortie (violet) en court-circuit pour une tension d'entrée de 10.5 [V]

Une erreur a été effectuée lors de la mesure. En effet, le sens de la pince ampéremétrique a été inversé impliquant un déphasage de 180° entre le courant d'entrée et le courant de sortie.

Le courant de sortie et le courant d'alimentation sont donc en phase. L'hypothèse peut être vérifiée en calculant le courant au stator et en rapportant le courant du rotor. Cela sera effectué a posteriori.

Le courant au stator est la différence du courant d'alimentation et du courant au rotor. Le tableau ci-dessous présente les valeurs de la courbe précédente :

Courant du réseau [Arms]	68,8
Courant au rotor [Arms]	45,5
Courant au stator [Arms]	23,3

Tableau 11 : Valeurs des courants du régulateur à induction lors d'un court-circuit pour une tension d'alimentation de 10.5 [V].

3.6.2 Détermination de $X_{\sigma s}$ et $X'_{\sigma r}$ du schéma équivalent

A partir de ces informations, les éléments restants du schéma équivalent peuvent être déterminés. Pour rappel, le schéma du transformateur en court-circuit est le suivant :

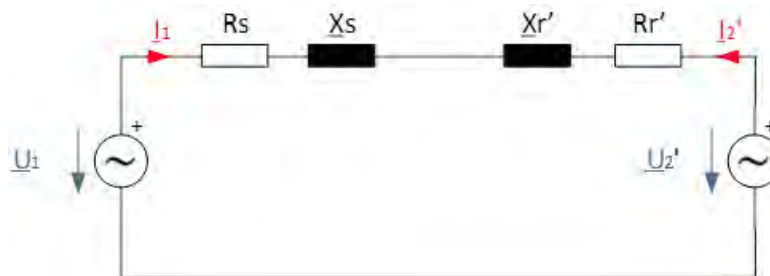


Figure 33 : Schéma équivalent du régulateur à induction en court-circuit

Les valeurs suivantes ont été mesurées :

$$\underline{u} = 1.95 \angle 180^\circ \quad I_1 = 23.3[A] \quad I_2 = 45.5[A] \quad U_1 = 10.5 [V]$$

Le courant du secondaire est rapporté :

$$I_2' = \frac{I_2}{\underline{\ddot{u}}} = -\frac{I_2}{\underline{\ddot{u}}} = -\frac{45.5}{1.95} = -23.3[A]$$

Le courant rapporté au primaire et le courant du primaire correspondent parfaitement. Cela implique qu'aucun courant ne circule dans la branche magnétisante.

Les tensions rapportées dans le schéma équivalent peuvent être calculées :

$$U_2' = U_1 \cdot \underline{\ddot{u}} = 10.5 \cdot (1.95 \angle 180^\circ) = -20.475[V]$$

$$U_{comp} = U_1 - U_2' = 10.5 - (-20.475) = 30.975[V]$$

L'impédance en court-circuit peut être calculée :

$$Z_{comp} = \frac{U_{comp}}{I_1} = \frac{30.975}{24} = 1.32[\Omega]$$

$$X_\sigma = \sqrt{Z_{comp}^2 - (R_r' + R_s)^2} = \sqrt{1.32^2 - (0.092 \cdot 1.95^2 + 0.052)^2} = 1.226[\Omega]$$

Les impédances X_s et X_r' sont supposées identiques :

$$X_{\sigma s} \cong X_{\sigma r'} \cong \frac{X_\sigma}{2} = \frac{1.226}{2} = 0.613[\Omega]$$

3.7 Essais sous charge

Un test de la répartition des puissances est ensuite réalisé. Pour cela, un chauffage triphasé de 5 [kW] est placé en sortie du régulateur à induction. Le rotor se trouve en position maximale :

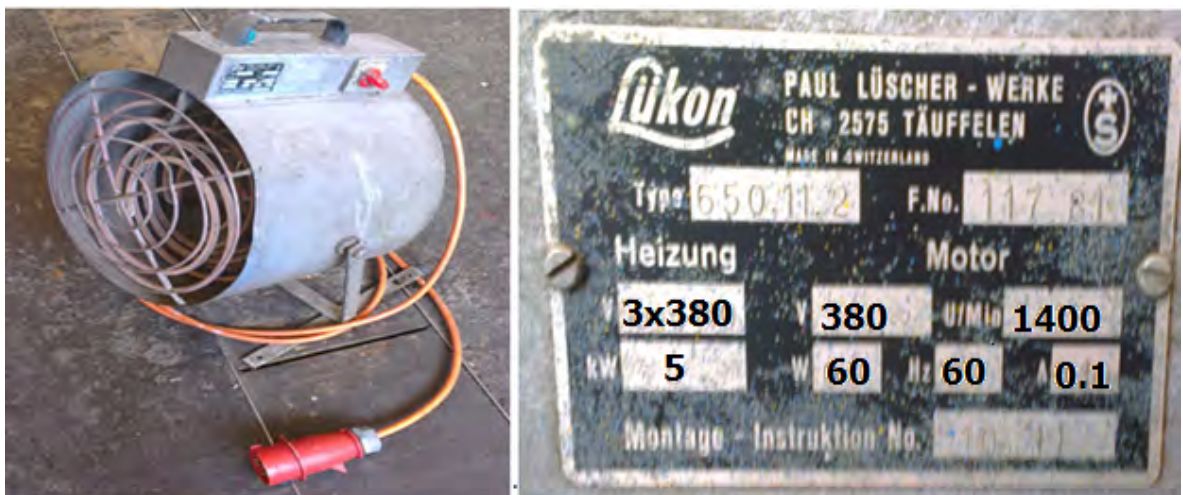


Figure 34 : Charge pour le test, chauffage triphasé de 5 [kW]

3.7.1 Schéma de la mesure

Trois puissances sont mesurées : en entrée, en sortie et au milieu. Les mesures sont réalisées à l'aide du wattmètre triphasé. Le test est effectué avec un courant d'entrée de 15 ampères pour des raisons d'alimentation électrique :

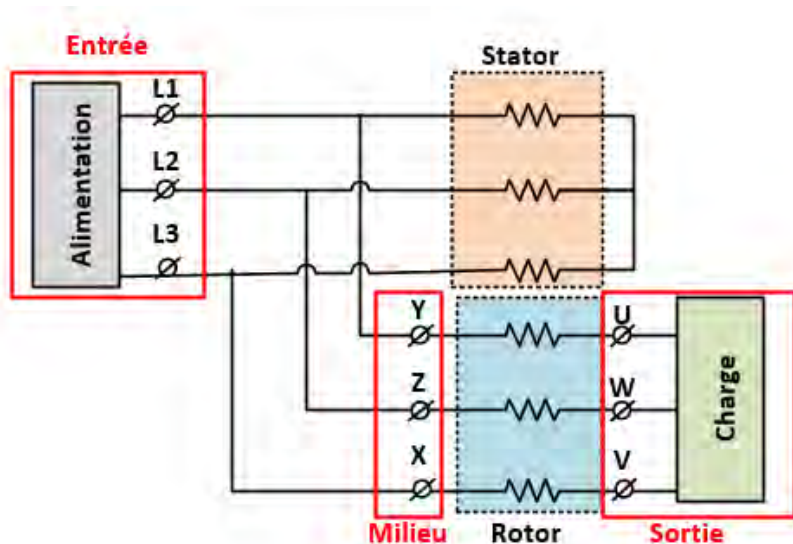


Figure 35 : Schéma de mesures des puissances en charge

3.7.2 Résultats

Les résultats des mesures sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Le premier contient les informations sur les puissances des trois phases. Le second montre seulement le résultat de la phase L1. Cela a semblé être judicieux car le système n'est pas parfaitement symétrique.

Dans les tableaux suivants, les points de *stator* sont calculés en effectuant la soustraction de la puissance d'entrée et celle du milieu. Seules les puissances actives et réactives sont soustraites entre elles. La puissance apparente et le $\cos(\phi)$ sont recalculés :

	Tension _{moyenne} de ligne [V]	Courant [A]	S [VA]	Q [Var]	P [W]	cos(phi) [-]
Entée	271	14,8	6940	3360	6070	0,87
Milieu	271	8,1	3850	0	3850	1
Sortie	400	8	5570	0	5570	1
Stator	271	8,65	4027	3360	2220	0,54
Rendement [%]						91,76

Tableau 12 : Tableau des résultats de la puissance en charge pour les trois phases

	Tension _{phase} [V]	Courant [A]	S [VA]	Q [Var]	P [W]	cos(phi) [-]
Entée	157	14,8	2310	1140	2010	0,87
Milieu	157	8,1	1270	0	1270	1
Sortie	231	8	1850	0	1850	1
Stator	157	8,65	1359	1140	740	0,54
Rendement [%]						92,04

Tableau 13 : Tableau des résultats de la puissance en charge pour la phase L1

En analysant le Tableau 13, la grande partie de la puissance passe directement par le rotor. Une partie moins importante vient se rajouter entre le milieu et la sortie depuis le stator. La répartition de la puissance active est d'environ $\frac{2}{3}$ pour le rotor et à $\frac{1}{3}$ pour le stator. Le rendement de l'installation est de 92%.

La figure suivante illustre la répartition du flux de puissance active :

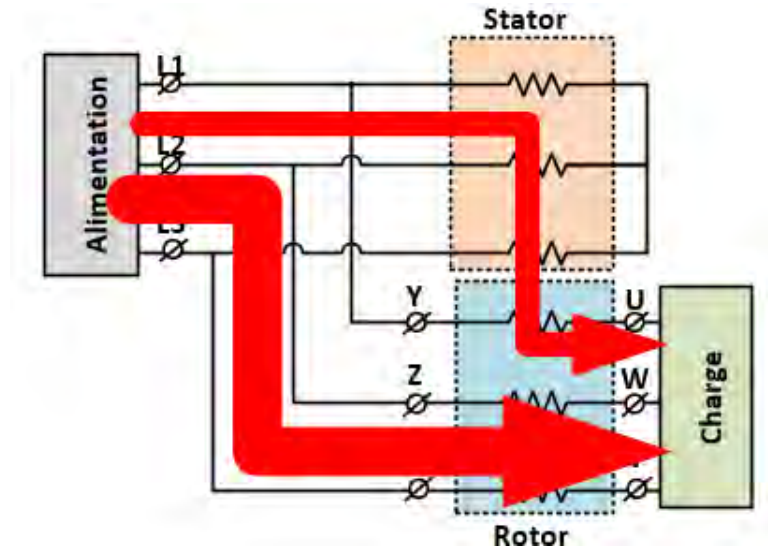


Figure 36 : Représentation du flux de puissance active

4 RELEVES MAGNETIQUES ET ELECTRIQUES

Suite aux essais réalisés, le régulateur à induction a été démonté. Les types de bobinage rotoriques et statoriques peuvent donc être relevés. De plus, les dimensions du paquet de tôle pourront être recueillies.

4.1 Caractéristiques électriques et bobinage

Ce sous-chapitre comprend le relevé électrique du rotor et du stator.

4.1.1 Rotor

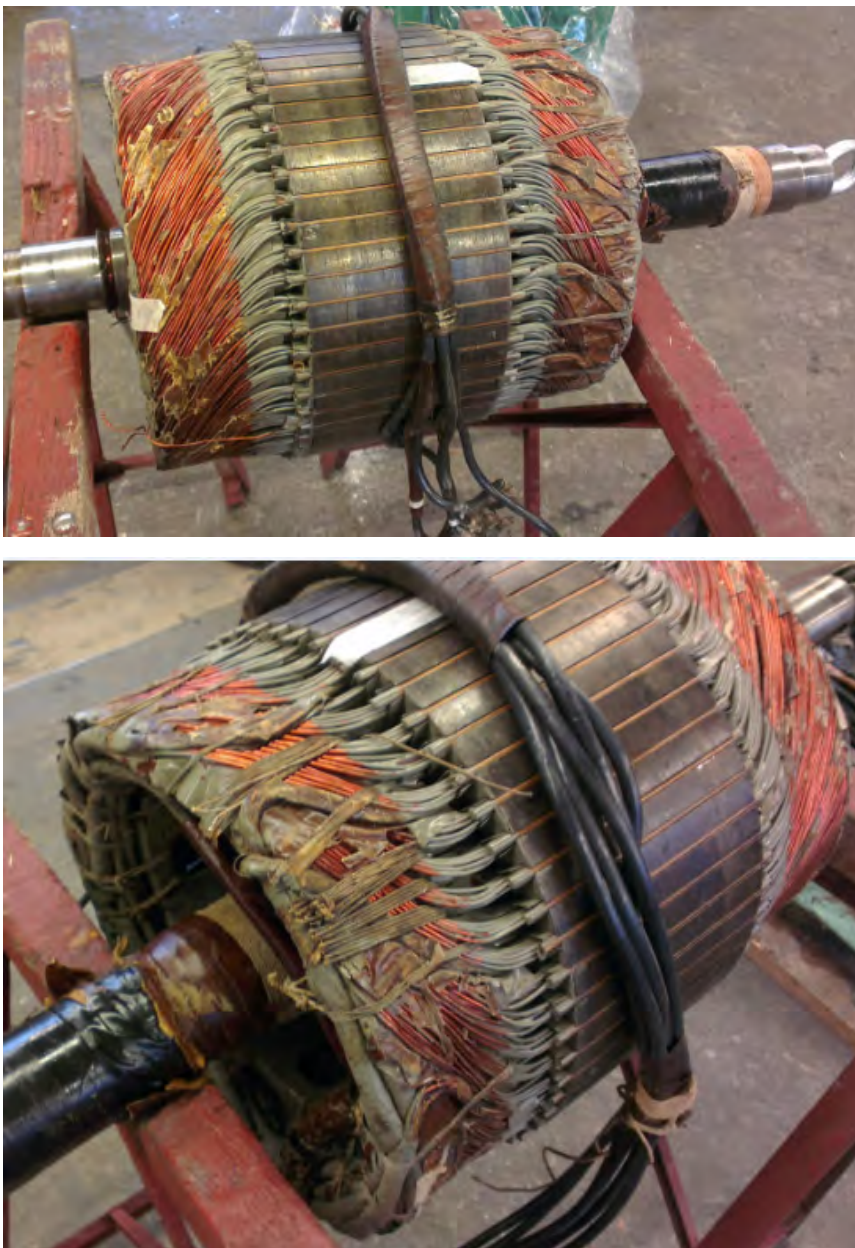


Figure 37 : Rotor de la machine après démontage



Figure 38 : Photo d'une encoche de 8 et de 12 spires et des 4 conducteurs en parallèle



Figure 39 : Tête de bobine après démontage

• Description du bobinage

Il s'agit d'un bobinage 4 pôles de deux couches (type: demi-rainure). Le rotor se compose de 60 encoches, cela représente $q=5$ encoches par pôle et par phase. Une spire se compose de 4 conducteurs de $\varnothing 2.26$ [mm] en parallèle. Le bobinage comprend une subtilité : la bobine de la première encoche du pôle est composée de 3 spires, puis les quatre suivantes de 2 spires. Cela représente une encoche de 24 conducteurs suivis de quatre encoches de 16 conducteurs.

A l'Annexe 4 se trouve le schéma du principe du bobinage pour une encoche en demi-rainure.

A l'Annexe 5 figure le schéma de bobinage du rotor. Ce type de bobinage permet d'obtenir des têtes de bobines très plates. Cela est bien visible à la Figure 37.

Pour le cas présent, le nombre de spires d'une phase peut être calculé de la manière suivante :

$$N = \frac{\#_{\text{fil 1er encoche}} + \#_{\text{fil 2em encoche}} + \#_{\text{fil 3em encoche}} + \#_{\text{fil 4em encoche}} + \#_{\text{fil 5em encoche}}}{\#_{\text{fils en parallèle par bobine}} \cdot \#_{\text{couche de bobinage}}} \cdot \#_{\text{bobine en série}}$$

$$N = \frac{24 + 16 + 16 + 16 + 16}{4 \cdot 2} \cdot 4 = 44$$

• Facteur de distribution

Les bobines étant décalées, la tension induite totale n'est pas l'addition scalaire des tensions induites de chaque spire. Il faut prendre en compte un facteur de distribution. Dans un premier temps, il faut déterminer l'angle entre chaque tension induite. Le schéma ci-dessous représente la situation :

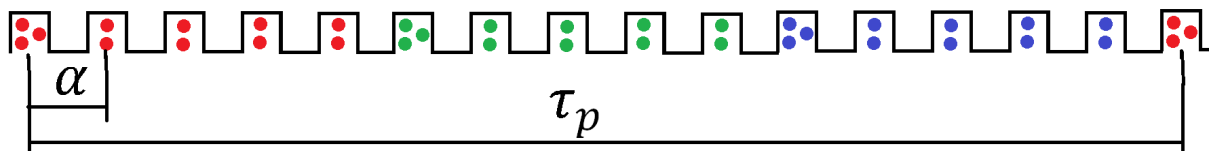


Figure 40 : Déphasage entre chaque tension induite au rotor

Le pas polaire représente 180° électriques. Il se compose ici de 15 dents. L'angle entre les tensions induites peut se calculer en divisant 180° par 15, soit $\alpha=12^\circ$ électriques.

Le facteur de distribution correspond au rapport entre la somme des tensions induites avec leur déphasage et la somme des tensions induites en phase.

Dans le cas présent, le cas généralisé ne peut pas être considéré. En effet, la première bobine se compose de trois spires. Cela implique une tension induite une fois et demie plus élevée que les bobines de deux spires.

Le facteur de bobinage est calculé en utilisant une méthode graphique (voir figure suivante) :

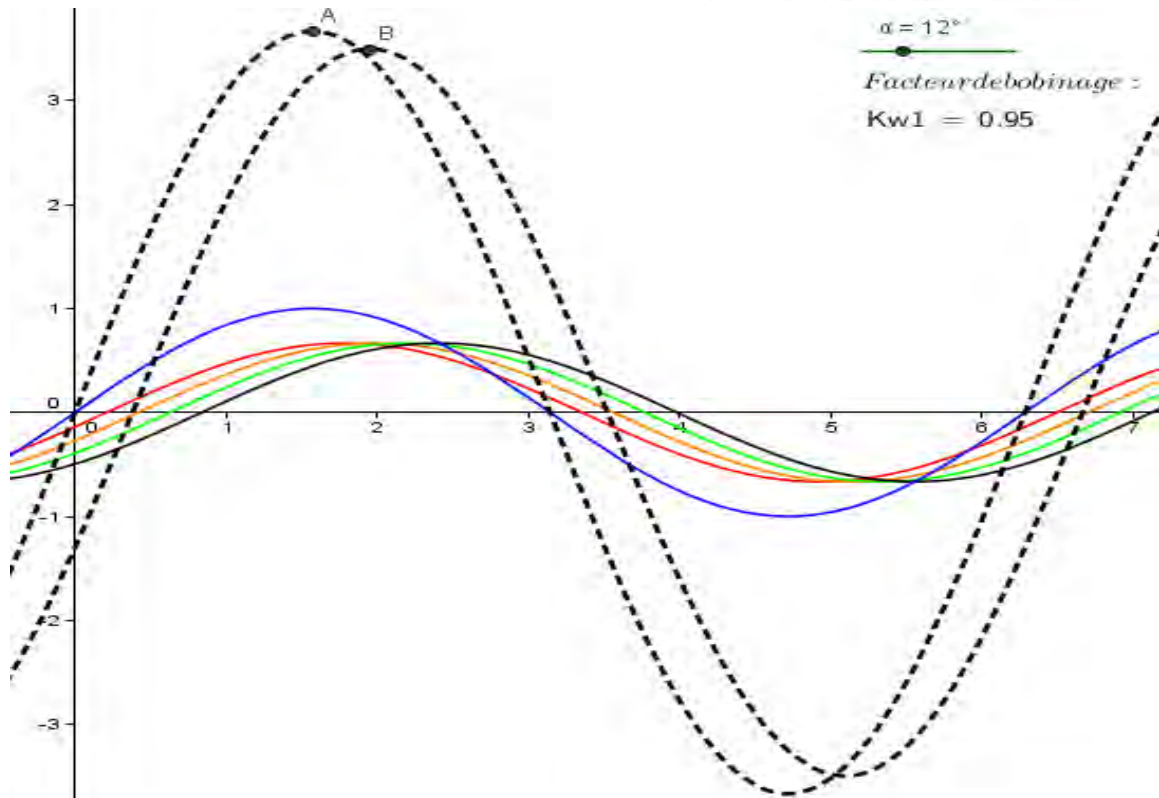


Figure 41 : Schéma explicatif du facteur de bobinage de distribution au stator

Il peut aussi être représenté de façon vectorielle :

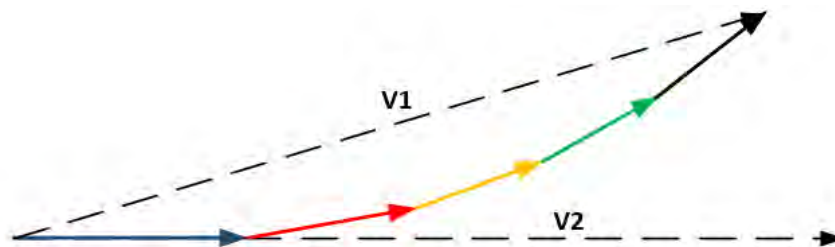


Figure 42 : Diagramme des phaseurs pour le facteur de distribution du rotor

En appliquant les valeurs :

$$k_{zw1_{rotor}} = \frac{\underline{V1}}{\underline{V2}} = \frac{\left| 1 \angle 0^\circ + \frac{2}{3} \angle 12^\circ + \frac{2}{3} \angle 24^\circ + \frac{2}{3} \angle 36^\circ + \frac{2}{3} \angle 48^\circ \right|}{1 + 4 \cdot \frac{2}{3}} = 0.953$$

Les deux méthodes donnent le même résultat, soit **0.953**.

- **Comparaison avec un bobinage « symétrique »**

Le facteur de distribution du bobinage rotorique est comparé à un bobinage où toutes les bobines seraient composées de deux spires. Cela est réalisé afin de voir l'effet des deux types de bobinage sur les harmoniques de rang supérieur.

Harmonique	$k_{wv_{rotor}}$ 5 x 2 spires	$k_{wv_{rotor}}$ 3 spires + 4 x 2 spires	Différence [%]
1	0,956	0,953	0,33
3	0,647	0,622	3,9
5	0,2	0,157	27
7	0,149	0,225	33
9	0,247	0,303	18

Tableau 14 : Tableau comparatif du facteur de distribution entre un bobinage symétrique et non-symétrique

Le fait d'avoir une spire de plus dans la première encoche permet d'adapter le rapport de transformation. Cela modifie la valeur de la tension induite mais ne joue aucun rôle important sur les harmoniques de rang supérieur.

4.1.2 Stator



Figure 43 : Photo du stator après démontage



Figure 44 : Photo d'un pôle de la machine



Figure 45 : Photo d'une encoche du stator

- **Description du bobinage**

Il s'agit d'un bobinage 4 pôles, simple couche (type concentrique). Le stator se compose de 72 encoches. Cela représente $q=6$ encoches par pôle et par phase. Une bobine se compose de 2 conducteurs de $\varnothing 3.4$ [mm] en parallèle. Chaque encoche comprend 14 conducteurs.

A l'Annexe 6, se trouve le schéma de bobinage du stator. Ce type de bobinage permet d'obtenir peu de croisement entre les têtes de bobine. Cela est bien visible aux Figure 43 et Figure 44.

Pour le cas présent, le nombre de spires en série d'une phase peut être calculé de la manière suivante :

$$N = \frac{\# \text{fil par encoche} \cdot \# \text{encoches par pôle et par phase}}{\# \text{fil en parrallèle}} \cdot \# \text{bobine en série} = \frac{14 \cdot 6}{2} \cdot 2 = 84$$

- **Facteur de distribution**

Le bobinage étant régulier, le facteur de bobinage peut être calculé de manière conventionnelle. L'angle entre les tensions induites est représenté à la figure suivante :

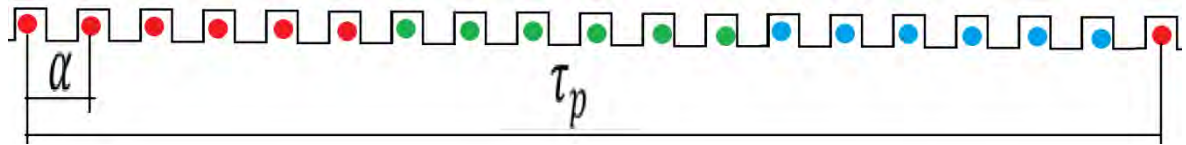


Figure 46 : Déphasage entre chaque tension induite au stator

Le pas polaire représente 180° électriques et est composé de 18 dents. L'angle entre les tensions induites vaut donc $180^\circ/18$ soit $\alpha=10^\circ$.

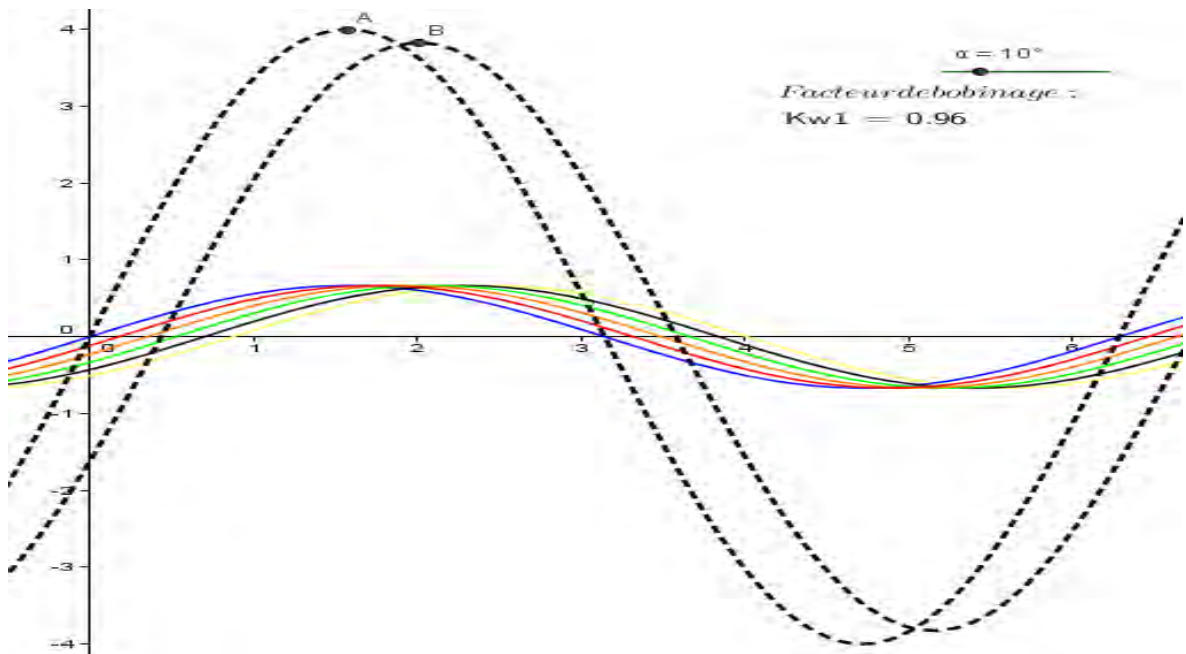


Figure 47 : Explicatif du facteur de bobinage du stator

La figure ci-dessus représente schématiquement le facteur de distribution pour le cas présent. Il peut aussi se calculer de la manière suivante [2] :

$$k_{zw1_{stator}} = \left| \frac{\sin\left(\frac{q \cdot \alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right| = \left| \frac{\sin\left(\frac{6 \cdot \pi}{2 \cdot 16}\right)}{6 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 16}\right)} \right| = 0.956$$

- **Facteur d'inclinaison des dents :**

Le stator présente une inclinaison de 4° , cela correspond 0.8 dents. Le pas polaire vaut 18 dents. Le facteur de réduction se calcule de la manière suivante [1] :

$$k_{sq1_{stator}} = \frac{\sin\left(\frac{s \cdot \pi}{\tau_p \cdot 2}\right)}{\frac{s \cdot \pi}{\tau_p \cdot 2}} ; \quad s = \text{décalage}$$

$$k_{sq1_{stator}} = \frac{\sin\left(\frac{0.8 \cdot \pi}{18 \cdot 2}\right)}{\frac{0.8 \cdot \pi}{18 \cdot 2}} = 0.999$$

4.1.3 Rapport de transformation

Pour calculer le rapport de transformation, il faut prendre en compte le nombre de spires ainsi que les différents facteurs de bobinage. Le rapport de transformation se calcule de la manière suivante [2] :

$$\dot{u} = \frac{N_{stator} \cdot k_{sq1_{stator}} \cdot k_{zw1_{stator}}}{N_{rotor} \cdot k_{zw1_{rotor}}} = \frac{84 \cdot 0.999 \cdot 0.956}{44 \cdot 0.953} = 1.913$$

Pour rappel, le rapport de transformation entre la tension induite et la tension d'alimentation déduite des mesures est de 1.954. Il y a une erreur de +2.1 % entre ces deux rapports.

4.2 Caractéristiques magnétiques

Ce sous-chapitre décrit les dimensions du fer de la machine.

4.2.1 Rotor

Le paquet de tôle a un diamètre extérieur de 380.4 [mm], un diamètre intérieur de 256 [mm] et une longueur de 162 [mm]. Il se compose de tôles en acier d'une épaisseur de 0.5 [mm]. Il est constitué de 60 encoches :

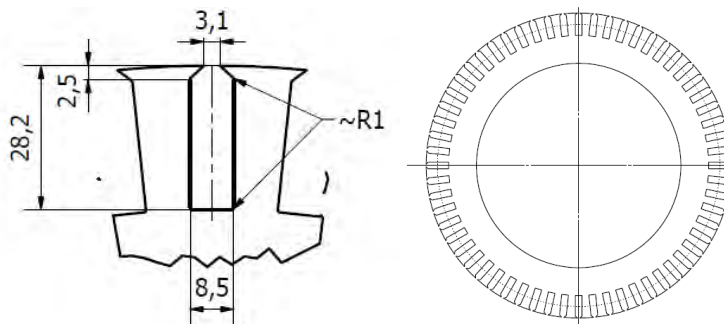


Figure 48 : Dimension de l'encoche du rotor et forme du fer



Figure 49 : Photo du fer du rotor après démontage

4.2.2 Stator

Le paquet de fer à un diamètre extérieur de 595 [mm], un diamètre intérieur de 383 [mm] et une longueur de 170 [mm]. Il se compose de tôles en acier d'une épaisseur de 0.5 [mm]. Il se constitue de 72 encoches. Celles-ci les sont inclinées de 4° (0.8 dents).

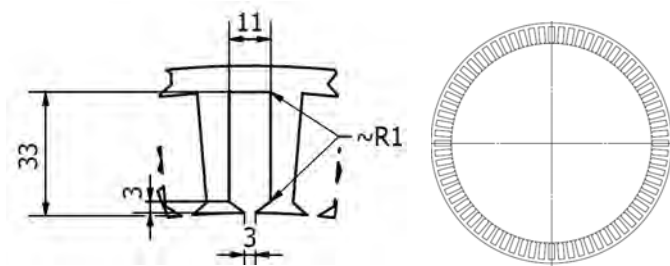


Figure 50 : Dimensions de l'encoche du stator et forme du paquet de tôle

4.2.3 Entrefer

Le diamètre intérieur du stator étant de 383 [mm] et le diamètre extérieur du rotor étant de 380.4 [mm], l'entrefer vaut 1.3 [mm].

$$\delta = 1.3 \text{ [mm]}$$

4.2.4 Résumé des grandeurs mécaniques

Le tableau suivant présente un résumé des valeurs du paquet de tôle du stator et du rotor :

	Rotor	Stator
Diamètre intérieur [mm]	256	383
Diamètre extérieur [mm]	380,4	595
Hauteur de la culasse [mm]	48,1	89,5
Longueur du fer [mm]	162	170
Epaisseur des tôles [mm]	0,5	0,5
Nombre d'encoches [-]	60	72
Largueur d'encoches [mm]	28,2	33
Hauteur d'encoche [mm]	8,5	11
Nombre d'encoches par pôle et par phase, q [-]	5	6
Inclinaison des dents [°]	0	4
Entrefer [mm]	1,3	

Tableau 15 : Résumé des grandeurs de la machine

5 SIMULATION DE LA MACHINE EXISTANTE

Les dimensions et le type de bobinage de la machine étant connus, le régulateur à induction est modélisé à l'aide du logiciel de simulation par éléments finis ANSYS® Maxwell®. La version de ce programme 16.0.0 est utilisée.

Simuler le régulateur à induction et comparer les résultats aux mesures de la machine dans sa configuration initiale permet d'avoir un modèle fiable pour le choix du nouveau bobinage.

5.1 Modélisation de la machine

La machine est simulée en 2D. Pour cela, il faut rentrer les dimensions, le type de bobinage ainsi que le schéma de câblage de la machine.

5.1.1 Dimension mécanique

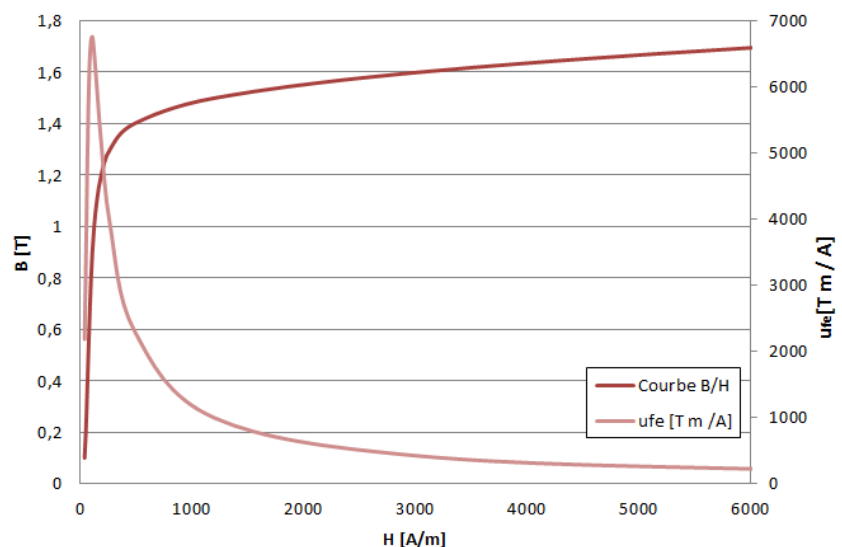
Les dimensions de la machines sont rentrées selon le Tableau 15.

- **Type de tôle**

Le type de tôle de la machine n'étant pas connu, la tôle 350-M50A du fabricant SURA a été choisie. Il s'agit d'une tôle conventionnelle utilisée pour les machines électriques.

La caractéristique de cette tôle est exposée ci-dessous :

B [T]	H[A/m]	ufe [T m / A]
0,1	36,4	2186
0,2	48,1	3309
0,3	56,1	4255
0,4	63,2	5037
0,5	70,2	5668
0,6	77,5	6161
0,7	85,6	6508
0,8	94,8	6715
0,9	106	6757
1	122	6523
1,1	146	5996
1,2	185	5162
1,3	264	3919
1,4	481	2316
1,5	1200	995
1,6	3025	421
1,7	6186	219
1,8	10720	134



Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	3,29	Coercivity (DC), A/m	45
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,39	Relative permeability at 1.5 T	1050
Anisotropy of loss, %	10	Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42
Magnetic polarization at 50 Hz		Yield strength, N/mm ²	320
H = 2500 A/m, T	1,58	Tensile strength, N/mm ²	460
H = 5000 A/m, T	1,67	Young's modulus, RD, N/mm ²	200 000
H = 10000 A/m, T	1,78	Young's modulus, TD, N/mm ²	210 000
		Hardness HV5 (VPN)	160

Figure 51 : Fiche technique de la tôle SURA M350-50A

5.1.2 Bobinage

Le bobinage de la machine est respecté. Pour le rotor, il s'agit d'un bobinage en demi-rainure selon le chapitre 4.1.1. Pour le stator, il s'agit du bobinage selon le chapitre 4.1.2.

A la figure suivante est exposé le modèle 2D du régulateur à induction :

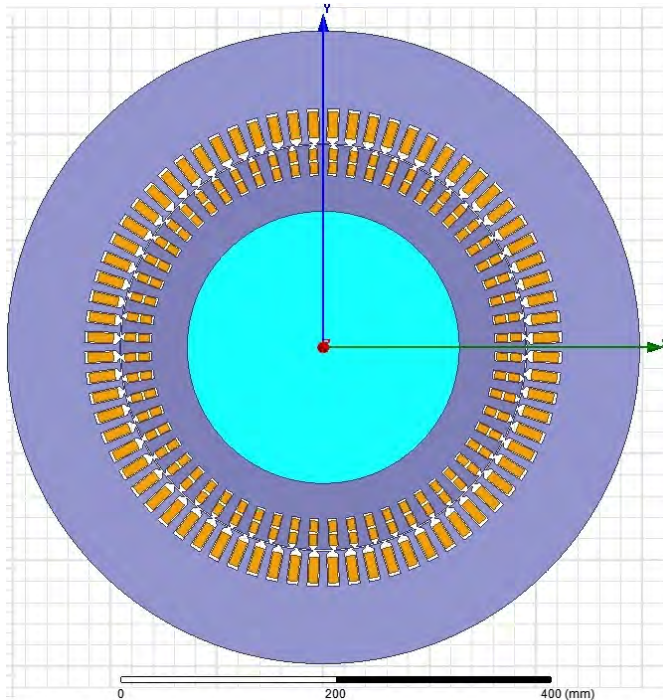


Figure 52 : Modèle Maxwell 2D du régulateur à induction

5.1.3 Circuit externe

Le circuit de la machine n'étant pas trivial, il est repris en externe à l'aide du logiciel ANSYS Maxwell Circuit Editor. Le schéma est présenté à la figure suivante :

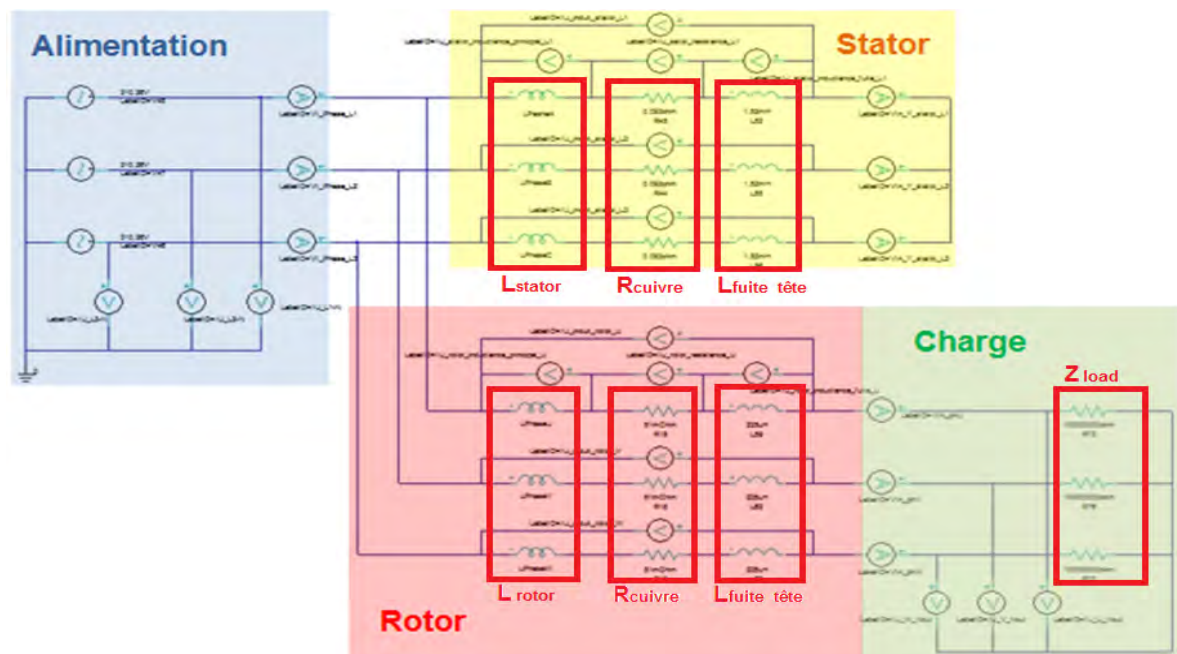


Figure 53 : Circuit externe du régulateur à induction

Le circuit se compose de l'alimentation, du circuit rotorique, du circuit statorique et de la charge. L'alimentation et la charge sont des paramètres variables. Concernant le rotor et le stator, ils sont représentés par l'inductance du bobinage (simulé par éléments finis), la résistance cuivre de l'enroulement (définie selon les mesures) et l'inductance de fuite des têtes de bobine (définie selon les calculs). L'inductance de fuite des encoches est simulée au sein du modèle 2D.

La résistance cuivre des enroulements se base sur des mesures effectuées selon le Tableau 3 (rotor : 92[mΩ] – stator : 52 [mΩ]).

L'inductance de fuite des têtes des bobines est calculée selon le chapitre 2.3.7 à l'aide du script de simulation avec le nombre de spires et les facteurs de bobinage de la machine (rotor : 225[uH] – stator : 1.52 [uH]).

5.2 Simulation de la machine

Tous les essais réalisés lors des mesures de la machine sont reproduits à l'aide de la simulation par éléments finis. Ainsi une comparaison objective peut être réalisée.

5.2.1 Comportement à vide

Les premières simulations sont effectuées sans charge afin de simuler le comportement à vide de la machine.

- **Variation de l'angle du rotor**

Le régulateur à induction est alimenté avec une tension de phase de 220 [V] (tension nominale) et l'angle du rotor est progressivement varié entre 0° et 90°. Le résultat de la simulation est présenté à la figure suivante. Il s'agit des trois phases de sortie du régulateur à induction :

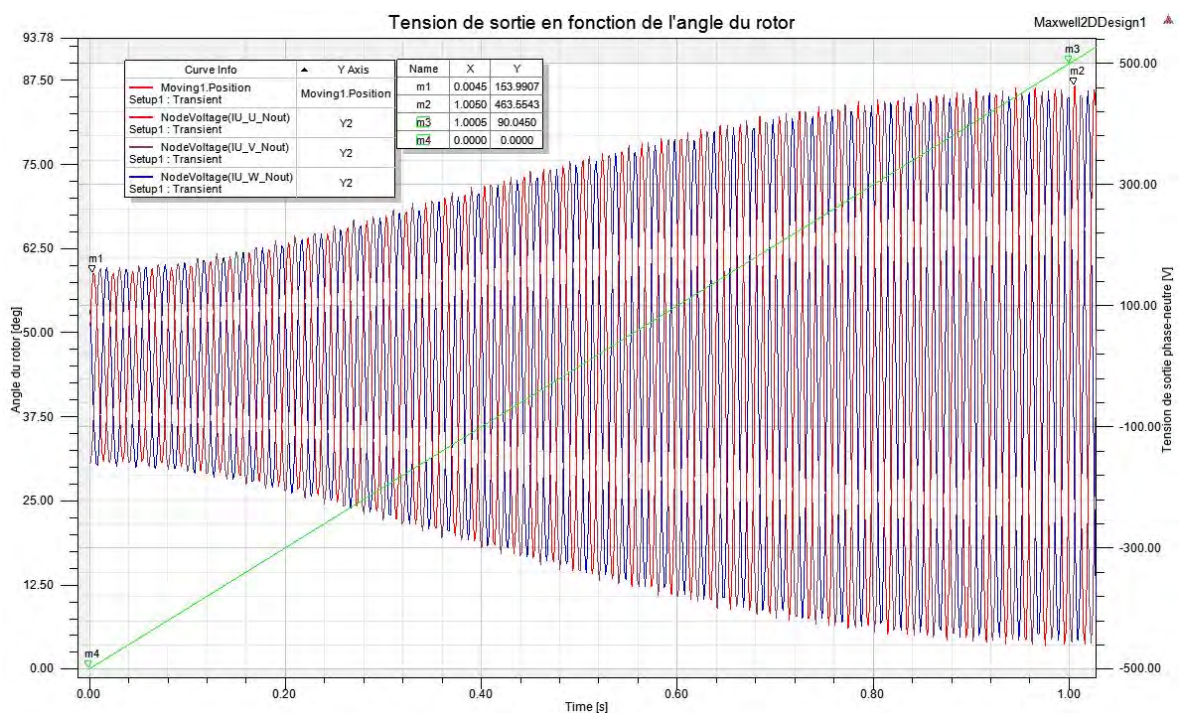


Figure 54 : Simulation de la variation d'angle du régulateur à induction pour une tension de phase d'alimentation de 220 [V]

Le spectre du graphique est intéressant : la tension crête de sortie varie entre 154 [V] et 464 [V], soit une valeur efficace variant de 109[V] à 330 [V].

- **Tableau des résultats à vide**

La synthèse des essais à vide est résumée dans le tableau suivant :

	Mesure (référence)	Simulation	Erreur [%]
U_{L1-N} [V]	220	220	0
cos(phi)_{reseau}	0,1	0,14	-
U_{omin} [V]	114,3	109	-5
U_{omax} [V]	327	330	1
I_o [A]	10,4	9	-13

N.B : Les tensions sont des tensions entre phase et neutre

Tableau 16 : Tableau comparatif entre mesures et simulations à vide

Les résultats de la machine à vide entre mesures et simulations correspondent bien. Il y a une erreur de 5% au maximum sur les tensions et de 13% au maximum sur le courant à vide. Cela est acceptable étant donné que la qualité du matériau du paquet de tôle n'est pas connue.

- **Comportement magnétique**

Le champ d'induction B dans la machine est représenté à la figure suivante :

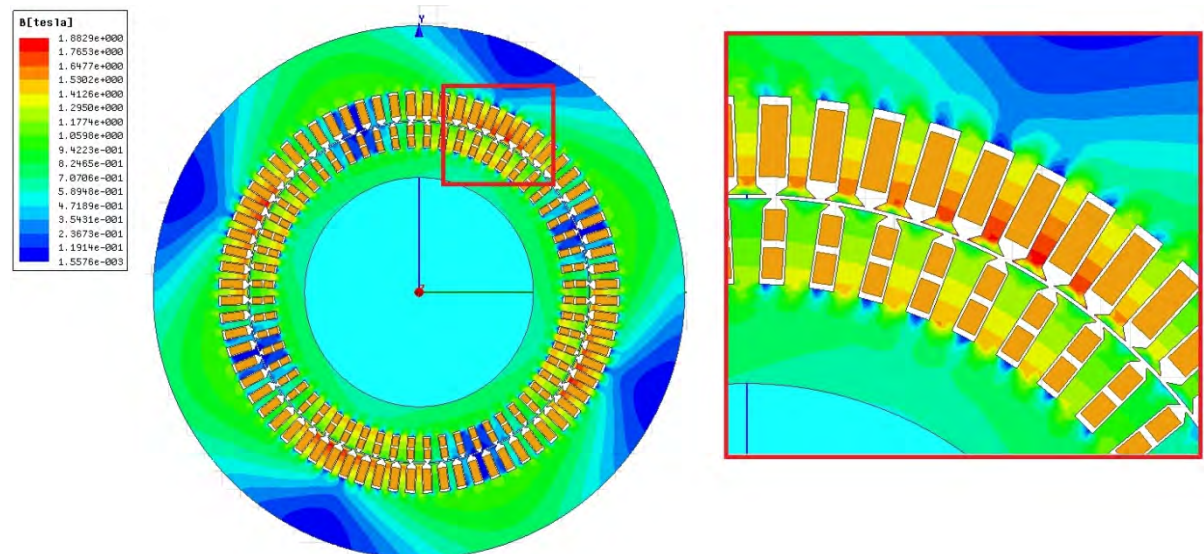


Figure 55 : Champ B dans le régulateur à induction à vide

Les quatre pôles de la machine sont bien visibles sur cette image. Les dents du stator présentent la plus haute valeur, soit 1.88 [T]. Cela n'est pas problématique étant donné que le champ est bien réparti et qu'une seule dent du pôle sature.

- **Inductance de champ principal**

Le programme de simulation par éléments finis Maxwell permet de calculer l'inductance principale d'une phase. Afin de calculer l'inductance cylindrique L_h créée par l'onde tournante il y a un rapport de $\frac{3}{2}$. [2]

$$L_h = \frac{3}{2} \cdot L_{h_phase}$$

Le tableau ci-dessous permet de comparer l'inductance de champ principal obtenu par la mesure et la simulation :

	Mesure (référence)	Simulation	Erreur [%]
Xh [Ohm]	21,3	25,7	21
Lh [mH]	67,8	81,9	21

Tableau 17 : Tableau comparatif des inductances de champ principal entre mesures et simulations

Il y a une différence de 21% entre mesures et simulations. Or le courant à vide a été mesuré à 10.4 [A] et simulé à 9 [A] pour une tension de phase d'alimentation de 220 [V] (13% d'erreur). La réactance de champ principale a une grande influence à vide, mais lorsque les autres éléments du schéma équivalents sont pris en compte (résistance au stator, résistance fer, inductance de fuite au stator), son influence diminue. Cela explique ainsi une erreur plus petite sur le courant à vide.

5.2.2 Comportement en court-circuit

Le rotor est placé en position maximale, la tension de phase d'alimentation est de 10.5 [V] et la sortie de la machine est mise en court-circuit. Le graphique des différents courant est présenté à la figure suivante (rouge : courant du réseau, vert : courant au stator, bleu : courant du rotor) :

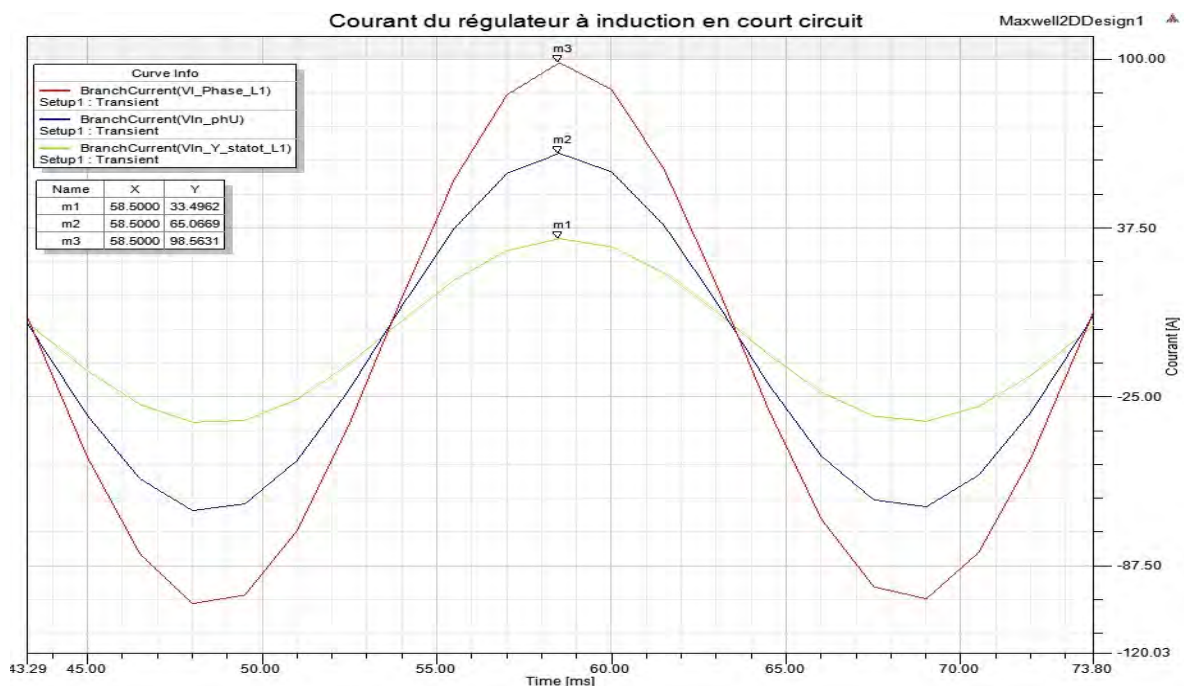


Figure 56 : Courant du régulateur à induction lors d'un court-circuit - Tension de phase d'alimentation 10.5 [V]

Tous les courants sont en phase. Le courant d'alimentation correspond à l'addition des courants statoriques et rotoriques.

L'erreur effectuée lors de la mesure en court-circuit (Figure 32) se confirme en simulation, le courant d'alimentation et le courant du rotor sont bien en phase.

Les valeurs pour l'essai en court-circuit sont résumées dans le tableau suivant :

	Mesure (référence)	Simulation	Erreur [%]
I_{réseau} [A]	69	69	0
I_{stator} [A]	23	23	0
I_{rotor} [A]	46	46	0
cos(phi)_{réseau}	0,36	0,4	-
U_{L1-N} [V]	10,5	10,5	0

N.B : Les tensions sont des tensions entre phase et neutre

Tableau 18 : Tableau comparatif de l'essai en court-circuit entre mesures et simulations pour une tension de phase d'alimentation de 10.5 [V]

Les résultats entre simulations et mesures correspondent parfaitement. Il y a une petite différence sur le cos(ϕ). Cela est parfaitement acceptable.

5.2.3 Comportement avec une charge ohmique

Le rotor est placé en position maximale, la tension de phase d'alimentation est de 157 [V] et la sortie du régulateur à induction est chargée avec trois résistances de 28.8 [Ω] en étoile.

La comparaison entre la mesure et la simulation est effectuée dans le tableau suivant :

	Mesure (référence)	Simulation	Erreur [%]
I_{réseau} [A]	14,8	15,14	2
I_{charge(rotor)} [A]	8	8,06	1
I_{stator} [A]	8,65	8,48	-2
cos(phi)_{réseau}	0,87	0,9	-
cos(phi)_{stator}	0,54	0,58	-
cos(phi)_{rotor}	1	1	-
cos(phi)_{chage}	1	1	-
U_{L1-N} [V]	157	157	0
U_{load} [V]	231	234	1

N.B : Les tensions sont des tensions entre phase et neutre

Tableau 19 : Tableau comparatif de l'essai avec charge ohmique de 28.8[Ω] en étoile entre mesures et simulations pour une tension de phase d'alimentation de 157 [V]

Les résultats de mesures et de simulations correspondent parfaitement. Il y a de petites différences de 2% au maximum. Cela est parfaitement acceptable.

5.2.4 Discussion des résultats de simulation

Les mesures effectuées ont toutes été reproduites par simulation. Les résultats obtenus correspondent très bien à la réalité.

Le modèle par éléments finis peut être validé. Ainsi, lors de la définition du nouveau bobinage de la machine, la simulation sera un outil de dimensionnement et de contrôle.

6 MODELE ANALYTIQUE DU SYSTEME EXISTANT

La démarche effectuée au chapitre précédent est à nouveau réalisée pour le modèle analytique. Les essais réalisés lors des mesures seront reproduits à l'aide du script de calcul du schéma équivalent monophasé. Cela permettra de comparer les résultats et ainsi le modèle analytique pourra être définitivement validé.

6.1 Modélisation de la machine

Deux manières peuvent être utilisées afin de déterminer les composants du schéma équivalent : par la mesure et par calcul.

6.1.1 Modélisation des composants du schéma équivalent par la mesure

Au chapitre 3, les composants du schéma équivalent ont été déterminés par les mesures à vide et en court-circuit. Pour rappel, les éléments sont les suivants :

X_h [Ohm]	21,3
R_{fer} [Ohm]	196,36
X_{os} [Ohm]	0,613
X'_{or} [Ohm]	0,613
R_s [Ohm]	0,052
R'_r [Ohm]	0,35
ü [-]	1,95

Tableau 20 : Tableau des éléments du schéma équivalent déterminés par la mesure

Dans un premier temps, ces valeurs seront insérées au script de calcul de l'Annexe 1. Dans un second temps, les situations de mesure à vide, en court-circuit et en charge seront calculées. Le tableau des résultats est présenté au chapitre suivant.

6.1.2 Modélisation des composants du schéma équivalent par le calcul

Les dimensions de la machine, le nombre de spires ainsi que les facteurs de bobinage rotor et stator étant connus, il est possible de déterminer la majorité des éléments du schéma équivalent par calcul selon la théorie du chapitre 2.3.7. Le script de calcul de l'Annexe 3 est utilisé.

Le tableau suivant présente les résultats ainsi qu'une comparaison avec les éléments obtenus par mesure. La colonne mesure représente les éléments obtenus lors des essais réalisés sur le régulateur à induction. La colonne calcul contient les éléments du schéma équivalent obtenus par calcul :

	Mesure	Calcul	Erreur [%]
X_h [Ohm]	21,3	26,5	24
R_{fer} [Ohm]	196,36	196,36	0
X_{os} [Ohm]	0,613	0,751	23
X'_{or} [Ohm]	0,613	0,8263	35
R_s [Ohm]	0,052	0,07	35
R'_r [Ohm]	0,35	0,46	31
ü [-]	1,95	1,91	-2

Tableau 21 : Tableau comparatif des éléments du schéma équivalent entre la mesure et le calcul

Seule la résistance fer n'a pas pu être calculée. Les valeurs calculées sont supérieures aux valeurs mesurées. L'ordre de grandeur correspond, il y a une différence maximale de 35% pour les inductances de fuite.

Ces valeurs seront insérées au script de calcul de l'Annexe 1. Ensuite, les situations de mesure à vide, en court-circuit et en charge seront calculées et comparées. Le tableau des résultats est présenté au chapitre suivant.

6.2 Tableau comparatif

Le tableau suivant comporte la totalité des résultats de mesure, de calcul analytique et de simulation afin d'en effectuer un comparatif. Dans la colonne mesure, les résultats effectués lors des essais sur la machine initiale sont résumés. Dans les colonnes Script mesuré et Script calculé, sont présentés les résultats obtenus lors du calcul analytique avec les éléments du schéma équivalent déterminés par la mesure et par le calcul. La colonne simulation présente les résultats du calcul par éléments finis.

		Mesure (référence)	Script mesuré	Script calculé	Simulation
Essai à vide pos. Min et Max Ualim 220[V]	UL1-N [V]	220	220	220	220
	cos(phi)reseau	0,1	0,1	0,13	0,14
	Uomin [V]	114,3	110	108	109
	Uomax [V]	327	329	331	330
	Io [A]	10,4	10,1	8,15	9
Essai en cc pos. Max Ualim 10,5[V]	Istator [A]	69	71	53	69
	Istator [A]	23	24	18	23
	Irotor [A]	46	47	35	46
	cos(phi)reseau	0,36	0,31	0,35	0,4
	UL1-N [V]	10,5	10,5	10,5	10,5
Essai en charge pos. Max Ualim 157[V] Charge en Y 28,8 [Ohm]	Ireseau [A]	14,8	14,88	14,4	15,14
	Icharge(rotor) [A]	8	8,14	8,18	8,06
	Istator [A]	8,65	8,67	7,63	8,48
	cos(phi)reseau	0,87	0,87	0,91	0,9
	cos(phi)stator	0,54	0,56	0,64	0,58
	cos(phi)rotor	1	1	1	1
	cos(phi)chage	1	1	1	1
	UL1-N [V]	157	157	157	157
	Uload [V]	231	234	235,6	234
Inductance de champ principal	Xh [Ohm]	21,3	21,3	27	25,72
	Lh [mH]	66,84	66,84	85,94	81,9

N.B : Les tensions sont des tensions entre phase et neutre

Tableau 22 : Tableau comparatif entre mesure, simulation et calcul analytique

Les résultats du modèle analytique avec les composants du schéma équivalent mesurés correspondent très bien aux mesures et à la simulation. Il n'y a pas de différences importantes.

Concernant le modèle analytique avec les composants du schéma équivalent calculés, l'ensemble des résultats correspond bien, sauf pour la mesure en court-circuit. En effet, les courants de court-circuit sont inférieurs de 23% à la mesure. Cette différence est expliquée par le fait que les composants du schéma équivalent calculés sont supérieurs à ceux mesurés.

6.3 Discussion des résultats du calcul analytique

Dans l'ensemble, le modèle analytique, la simulation et la mesure coïncident bien. Le modèle analytique ne prend pas en compte les phénomènes magnétiques et transitoires de la machine. Contrairement à la simulation, il présente l'avantage d'obtenir rapidement un bon résultat. Pour la définition du nouveau bobinage, le calcul analytique et la simulation numérique seront systématiquement comparés.

7 DEFINITION DU NOUVEAU BOBINAGE

Cette partie regroupe les étapes et la procédure ayant permis d'aboutir à la définition du nouveau bobinage de la machine. Une fois déterminé, les caractéristiques de la machines seront déterminées afin de pouvoir effectuer le calcul analytique et la simulation de la nouvelle machine.

7.1 Procédure de dimensionnement

Dans cette section, le dimensionnement du nouveau bobinage est réalisé. Pour cela les étapes suivantes sont réalisées :

- ◆ détermination des possibilités de bobinage en fonction du nombre d'encoches de la machine ;
- ◆ première estimation à l'aide du modèle analytique afin d'effectuer un premier choix rapide ;
- ◆ simulation et comparaison avec le modèle analytique pour un choix plus restreint de possibilités ;
- ◆ choix final d'un nouveau bobinage.

7.1.1 Nombre de conducteurs

Le rapport du nombre de spires au rotor et au stator doit être proche de 1 :

$$\ddot{u} \approx \frac{N_s}{N_r} \cong 1$$

Le nombre d'encoches au stator (72) et au rotor (60) étant différents, cela limite les choix possibles.

Dans le tableau ci-dessous sont listées les possibilités pouvant correspondre pour un bobinage avec un nombre de spires par encoche constant. En fonction du nombre de spires en série par phase, le nombre de spires par encoche est déterminé :

N _{phase rotor}	N _{phase stator}	N _{spires par encoche}	
		Rotor	Stator
60		6	5
90	84	9	7
100	96	10	8
120		12	10
180		18	15
240		24	20
300		30	25
360		36	30
420		42	35
480		48	40
540		54	45
600		60	50
660		66	55

Tableau 23 :Tableau des possibilités de bobinage pour un nombre de spires constant

Le bobinage de 90 spires au rotor et 84 spires au stator (90/84) et le bobinage de 100 spires au rotor et 96 au stator (100/96) sont proches du nombre de spires initiales, c'est

pourquoi ils sont présentés. Les autres possibilités comprennent le même nombre de spires au stator et au rotor.

Un essai a été réalisé sur la machine avec un fil de cuivre de $\varnothing 1.4$ [mm]. Cela permet de fixer les limites, soit 80 conducteurs au stator et 64 conducteurs au rotor. Cela représente un facteur de remplissage maximal de 0.45 pour le rotor et 0.375 pour le stator. Dans cette configuration, l'encoche de la machine est bien pleine mais permet encore sa fermeture. La différence entre ces deux facteurs provient de la répartition des conducteurs dans l'encoche.

N.B. : Le facteur de remplissage est défini sans aucune isolation.

Un tableau [Annexe 7] permet de déterminer le nombre de conducteurs pouvant être mis en parallèle en fonction du nombre de spires par encoches. Grâce à cela, la résistance des enroulements et la masse du cuivre peuvent être déterminés.

7.1.2 Première estimation du bobinage par calcul analytique

Une première estimation du bobinage est réalisée à l'aide du calcul analytique. Cela permet de se faire une idée et permet d'éviter de réaliser trop de simulations.

En fonction du nombre de spires par phase, les éléments du schéma équivalent peuvent être déterminés. Afin de les calculer, le script de calcul Matlab des composants de l'Annexe 3 est utilisé. La résistance fer a été considérée identique à la machine initiale.

Pour différents bobinages, des calculs à vide et en court-circuit pour les positions maximales et minimales sont réalisés pour une tension de phase d'alimentation de 230[V]. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (toutes les tensions sont des tensions de phase) :

Nombre spires		Essai à vide (tension de phase rms)			Essai en cc (courant réseau)	
Rotor	Stator	U_{omin} [V]	U_{omax} [V]	I_0 [A]	$I_{\text{ccpos_max}}$ [A]	$I_{\text{ccpos_min}}$ [A]
60		6,82	453	16,6	1146	16,9
90	84	9,16 (négatif)	469	7,8	498	8
100	96	2,64 (négatif)	462	6,63	432	6,64
120		6,7	453	4,2	282	4,24
180		7,86	453	2,11	125	2,15
240		10	451	1,51	70	1,53
300		13	451	1,3	45	1,3
660		51	438	1,08	9	1,1

Tableau 24 : Tableau des résultats du calcul analytique de différents bobinages

Un nombre de spires trop important implique une résistance des enroulements importante et une inductance de fuite très grande. Cela crée une chute de tension importante sur ces éléments impliquant une diminution de la tension induite et respectivement de la tension de sortie. De plus, les pertes cuivre seront plus importantes. Par conséquent, les modèles ayant un grand nombre de spires ne sont pas retenues.

7.1.3 Approfondissement et simulation des différents bobinages

Face au premier résultat, l'idée de base de garder un nombre de spires par encoches est modifiée. En effet, pour le cas de 90/84, la tension en position minimale est trop importante. C'est pourquoi d'autres possibilités sont envisagées tels que les bobinages : 90/86 et 90/88.

Désormais, étant donné la restriction effectuée sur le nombre de possibilités, des simulations par éléments finis peuvent être effectuées. Cela permet un contrôle du calcul analytique qui est un modèle linéaire.

Des calculs à vide et en court-circuit pour les positions maximales et minimales sont réalisés pour une tension de phase d'alimentation de 230[V]. Le calcul analytique et la simulation sont comparés. Les résultats pour les différents bobinages sont présentés dans les tableaux suivants (toutes les tensions sont des tensions de phase) :

Nombre spires rotor/stator : 60/60

	Analytique	Simulation
Uinduite [V]	223,2	-
Uomin [V]	6,82	-
Uomax [V]	453	-
Io [A]	16,6	-
Iccpos_max [A]	16,9	-
Iccpos_min [A]	1146	-
Lh [mH]	42	-

Nombre spires rotor/stator : 90/86

	Analytique	Simulation	Er [%]
Uinduite [V]	233,56	230,43	1,3
Uomin [V]	3,67 (négatif)	1,2 (négatif)	67,3
Uomax [V]	463	461,7	0,3
Io [A]	8,13	10,2	25,5
Iccpos_max [A]	533	498	6,6
Iccpos_min [A]	8,16	10,2	25,0
Lh [mH]	88,3	81	8,3

Nombre spires rotor/stator : 90/88

	Analytique	Simulation	Er [%]
Uinduite [V]	228,2	226	1,0
Uomin [V]	2	3,62	81,0
Uomax [V]	458,2	456	0,5
Io [A]	7,8	9,98	27,9
Iccpos_max [A]	521	504,2	3,2
Iccpos_min [A]	7,8	9,61	23,2
Lh [mH]	92,5	90	2,7

Nombre spires rotor/stator : 100/96

	Analytique	Simulation	Er [%]
Uinduite [V]	232,4	230,4	0,9
Uomin [V]	2,64 (négatif)	0,7 (négatif)	73,5
Uomax [V]	462	460,3	0,4
Io [A]	6,63	7,2	8,6
Iccpos_max [A]	432	397,74	7,9
Iccpos_min [A]	6,64	7,35	10,7
Lh [mH]	110	105	4,5

Tableau 25 : Tableau comparatif des résultats entre calcul analytique et simulation pour différents bobinages

La simulation et le calcul analytique donnent des résultats proches, sauf pour le cas 60/60. En effet, contrairement au calcul analytique, la simulation prend en compte les effets magnétiques tels que la saturation des tôles du fer. Cela a permis de voir, pour un bobinage de 60 spires au rotor et de 60 spires au stator, que la majorité des dents sont complètement saturées :

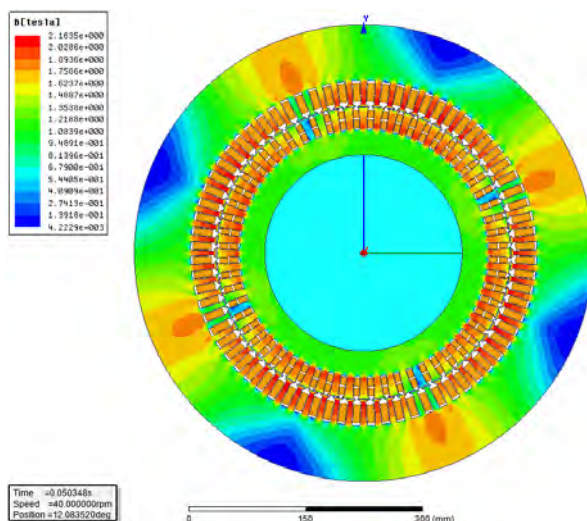


Figure 57 : Saturation de la machine pour un nombre de spires trop petit

7.2 Choix final du bobinage pour la remise à neuf

Les trois cas sont retenus pour les nombres de spires rotor/stator, à savoir : 90/86, 90/88 et 100/96. Pour rappel, le nombre de spires original du rotor et du stator était de 44/84. Les deux premiers choix sont plus intéressants car ils avoisinent le dimensionnement d'origine de la machine. C'est pourquoi le choix final se fera pour ces deux situations.

La seule différence notable entre ces deux possibilités est la tension de sortie en position minimale. Dans un cas, la tension induite à vide est plus grande que la tension d'alimentation. Dans l'autre cas, elle est plus petite. La situation est résumée aux figures suivantes :



Figure 58 : Illustration des tensions de sortie et des tensions induites

Une tension induite à vide plus grande que la tension d'alimentation est un avantage car en chargeant le régulateur induction, la tension aux bornes de l'enroulement rotorique aura tendance à diminuer s'approchant donc de 0 [V].

Le choix final est le bobinage comprend **90 spires au rotor** et **86 spires au stator**.

7.3 Caractéristiques du nouveau bobinage

La machine est bobinée en quatre pôles. Les caractéristiques du nouveau bobinage du rotor sont explicitées ci-dessous :

- ◆ le rotor se compose de 60 encoches. Cela représente 5 encoches par pôle et par phase ;
- ◆ une spire se compose de 7 conducteurs de diamètre 1.4 [mm] en parallèle. Chaque bobine se compose de 9 spires ;
- ◆ les bobines de la phase sont en série. Il y a 90 spires en série pour chaque phase ;
- ◆ chaque phase se compose de 10 bobines de 9 spires.

Les caractéristiques du nouveau bobinage du stator sont définies ci-dessous :

- ◆ le stator se compose de 72 encoches. Cela représente 6 encoches par pôle et par phase ;
- ◆ le bobinage n'est pas symétrique afin d'obtenir une tension proche de zéro ;
- ◆ une spire se compose de 10 conducteurs de diamètre 1.4 [mm] en parallèle ;
- ◆ la première encoche de chaque phase se compose de 8 spires. Les cinq suivantes se composent de 7 spires.
- ◆ les bobines de la phase sont en série. Il y a 86 spires en série pour chaque phase.

7.3.1 Schéma de bobinage

L'idée de base a été de créer un bobinage avec un pas constant. Pour des raisons de gabarit de fabrication, d'isolation et afin que les têtes de bobines ne soient pas trop grosses, le type de bobinage a été modifié.

Les schémas de bobinage du rotor et du stator sont disponibles à l'Annexe 8 et à l'Annexe 9. Les deux sont bobinés selon le même principe. Ce bobinage permet d'avoir peu de croisement entre les têtes de bobines.

7.3.2 Facteurs de bobinage au rotor

- **Facteur de distribution**

Le bobinage étant régulier, le facteur de bobinage peut être calculé de manière conventionnelle [2] :

$$k_{zw1_{staor}} = \left| \frac{\sin\left(\frac{q \cdot \alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right| = \left| \frac{\sin\left(\frac{5 \cdot \pi}{2 \cdot 15}\right)}{5 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 15}\right)} \right| = 0.957$$

7.3.3 Facteurs de bobinage au stator

- **Facteur de distribution**

Le nombre de spires par encoche n'étant pas constant, le facteur de distribution se calcule de la manière suivante (chapitre 4.1.1) :

$$k_{zw1_{rotor}} = \frac{|8 \angle 0^\circ + 7 \angle 10^\circ + 7 \angle 20^\circ + 7 \angle 30^\circ + 7 \angle 40^\circ + 7 \angle 50^\circ|}{8 + 5 \cdot 7} = 0.955$$

- **Facteur d'inclinaison des dents :**

Le stator présente une inclinaison de 4°. Le facteur d'inclinaison calculé au point 4.1.2 reste valable :

$$k_{sq1_{staor}} = 0.999$$

7.3.4 Densité de courant

Le rotor est bobiné à l'aide de 7 conducteurs de $\varnothing 1.4$ [mm] en parallèle. Cela représente une section équivalente de 10.8 [mm²]. Le stator est quant à lui bobiné avec 10 conducteurs de $\varnothing 1.4$ [mm] en parallèle. Cela donne une section équivalente de 15.4 [mm²].

En se basant sur un courant de 100 [A] passant au rotor et au stator, cela représente une densité de courant de :

$$J_r = \frac{I}{A_r} = \frac{100}{10.8} = 9.25 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

$$J_s = \frac{I}{A_s} = \frac{100}{15.4} = 6.5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

Pour des machines auto-ventilées, une densité de courant avoisinant 5 [A/mm²] est normale. Certaines machines refroidies à l'eau ont une densité de courant jusqu'à 15 [A/mm²].

Dans le cas présent, étant donné la bonne ventilation forcée et la courte durée d'un essai, une densité de 9.25 [A/mm²] est acceptable.

7.3.5 Facteur de remplissage

Chaque encoche du rotor est remplie avec 63 conducteurs. Le stator n'est pas régulier, certaines encoches se composent de 80 conducteurs, d'autres de 70 conducteurs. Les facteurs de remplissage (isolation des conducteurs et de l'encoche non-comprise) sont de :

$$k_{cu_r} = 0.44$$

$$k_{cu_{smin}} = 0.33 \quad k_{cu_{smax}} = 0.37$$

Toutes les encoches de la machines sont isolées avec deux isolants de 0.22 [mm] d'épaisseur afin d'assurer une meilleure durabilité de la machine. Ces isolants garantissent une isolation jusqu'à 155° (classe F).

7.4 Eléments du schéma équivalent

Le bobinage et les facteurs de bobinage étant connus, il est possible de définir tous les éléments du schéma équivalent. Les calculs du chapitre 2.3.7 et le script de calcul de l'Annexe 3 sont utilisés.

- **Rapport de transformation**

Pour calculer le rapport de transformation, il faut prendre en compte le nombre de spires ainsi que les différents facteurs de bobinage. Le rapport de transformation se calcule de la manière suivante [2] :

$$\dot{u} = \frac{N_{stator} \cdot k_{sq1stator} \cdot k_{zw1stator}}{N_{rotor} \cdot k_{zw1rotor}} = \frac{86 \cdot 0.999 \cdot 0.955}{90 \cdot 0.957} = 0.953$$

- **Résistances des enroulements et masse du cuivre**

Les résistances des enroulements rotoriques et statoriques sont calculées :

$$R_s = 0.094[\Omega] \quad R_r = 0.136[\Omega] \quad R'_r = \dot{u}^2 \cdot R_r = 0.953^2 \cdot 0.136 = 0.124[\Omega]$$

Les masses du cuivre au rotor et au stator sont calculées :

$$m_s = 35[kg] \quad m_r = 25[kg]$$

- **Inductances de fuite des encoches**

Les inductances de fuite des encoches au stator et au rotor sont calculées :

$$L_{\sigma N_s} = 502[\mu H] \quad L_{\sigma N_r} = 598[\mu H]$$

$$X_{\sigma N_s} = 0.158[\Omega] \quad X_{\sigma N_r} = 0.188[\Omega]$$

- **Inductances de fuite des têtes de bobines**

Les inductances de fuite des têtes de bobines au stator et au rotor sont calculées :

$$L_{w_s} = 2[mH] \quad L_{w_r} = 2.4[mH]$$

$$X_{w_s} = 0.627[\Omega] \quad X_{\sigma N_r} = 0.757[\Omega]$$

- **Inductances de fuite totale**

Les inductances de fuite totales au stator et au rotor sont calculées :

$$L_{\sigma s} = L_{\sigma N_s} + L_{w_s} = 2.598[mH]$$

$$X_{\sigma s} = X_{\sigma N_s} + X_{w_s} = 0.787 [\Omega]$$

$$L_{\sigma r} = L_{\sigma N_r} + L_{w_r} = 3 [mH]$$

$$X_{\sigma r} = X_{\sigma N_r} + X_{w_r} = 0.945 [\Omega]$$

$$X'_{\sigma r} = \dot{u}^2 \cdot R_r = 0.953^2 \cdot 0.945 = 0.857 [\Omega]$$

- **Inductance de champ principal**

L'inductance de champ principal est calculée depuis le stator puis depuis le rotor :

$$L_{hs} = 90.6 [mH]$$

$$X_{hs} = 28.46 [\Omega]$$

$$L''_{hr} = 94.5 [mH] \text{ (coté secondaire)}$$

$$X''_{hr} = 29.69 [\Omega] \text{ (coté secondaire)}$$

$$L_{hr} = \dot{u}^2 \cdot L''_{hr} = 0.953^2 \cdot 94.5 = 85.8 [mH]$$

$$X_{hr} = \dot{u}^2 \cdot X''_{hr} = 0.953^2 \cdot 29.69 = 26.94 [\Omega]$$

La différence entre l'inductance calculée au stator et l'inductance calculée au rotor puis rapportée vient de la différence de longueur du paquet de tôle. En effet, la longueur active du stator est de 170 [mm] contre 162[mm] pour le rotor. Afin de prendre le cas le plus critique, l'inductance rapportée du rotor est choisie :

$$L_h = 85.8 [mH]$$

$$X_h = 26.94 [\Omega]$$

- **Résistance fer**

La résistance fer a été considérée comme constante :

$$R_{fer} = 196.36 [\Omega]$$

Les éléments étant déterminés, ils seront intégrés au script de calcul analytique de l'Annexe 1 afin de pouvoir effectuer le calcul analytique du régulateur à induction.

8 CALCULS ET SIMULATIONS DU NOUVEAU BOBINAGE

Dans ce chapitre la machine dans sa nouvelle configuration sera calculée avec le modèle analytique et simulée par éléments finis. Les résultats seront comparés et pourront servir de base pour les mesures sur le régulateur à induction remis à neuf.

Les essais suivants sont réalisés : à vide, en court-circuit, avec une charge ohmique et avec une charge inductive. Le comportement des puissances du régulateur pour différents angles sera aussi étudié.

8.1 Marche à vide du régulateur à induction

Des essais sont réalisés avec la sortie du régulateur à induction à vide. Le premier test permet de voir l'évolution de la tension de sortie en fonction de l'angle du rotor. Le second essai permet de constater les puissances à vide du régulateur à induction.

8.1.1 Variation de l'angle du rotor

Le régulateur à induction est calculé sans charge, la tension d'alimentation de phase est de 230 [V] et l'angle du rotor est varié entre 0° et 90°.

La figure suivante illustre le résultat du calcul analytique :

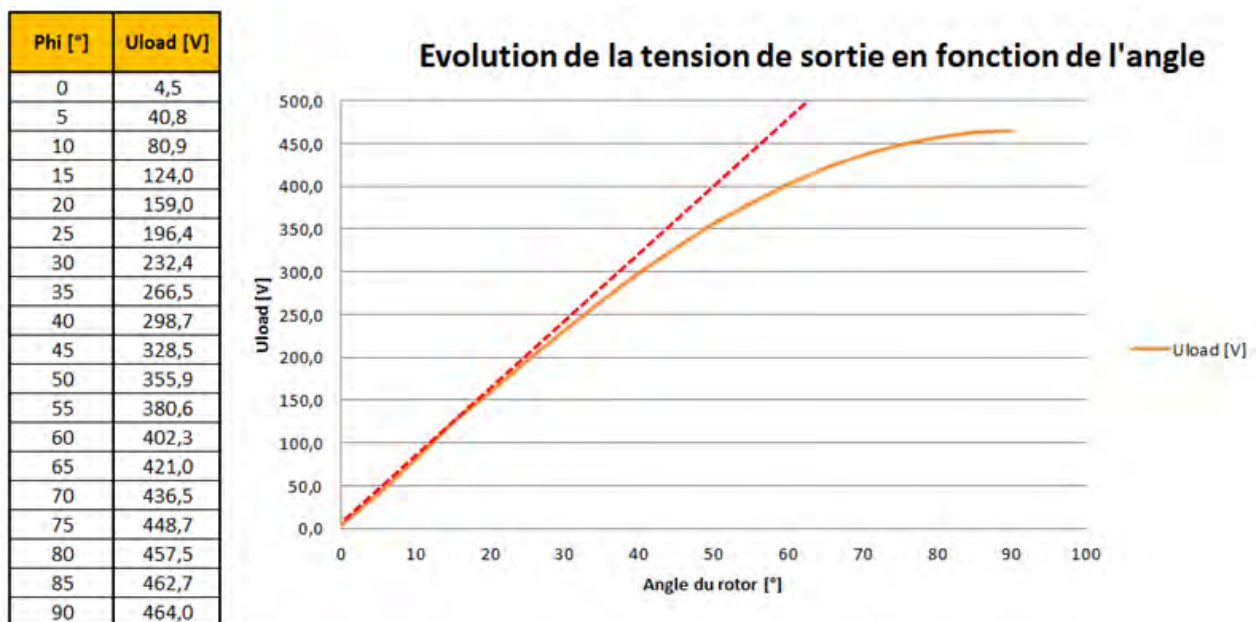


Figure 59 : Evolution de la tension de sortie en fonction de l'angle du rotor

La variation de la tension de sortie jusqu'à environ 30° est linéaire. La tension de sortie phase/neutre pour 30° est de ~230 [V] (ligne 400[V]), cela correspond à la tension nominale de la plupart des machines.

A la figure suivante est représenté le résultat de la simulation pour le même essai :

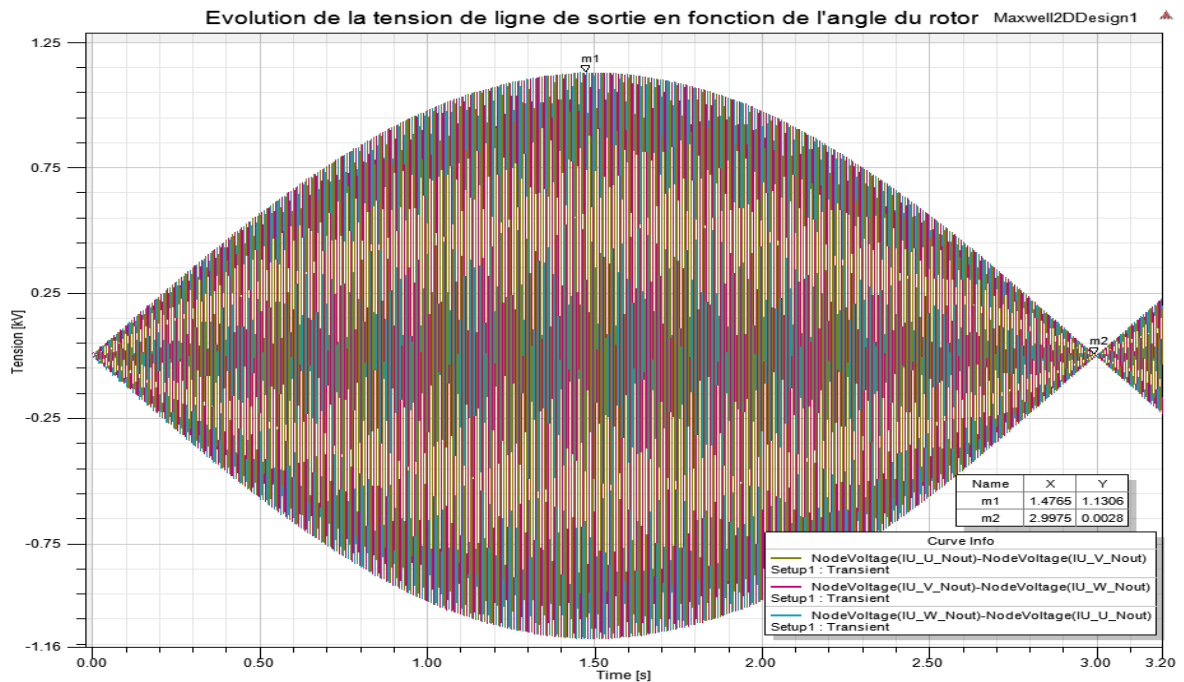


Figure 60 : Evolution de la tension de ligne de sortie en fonction de l'angle du rotor à vide

Sur cette image il est intéressant de visualiser le spectre de la tension de sortie. Le régulateur à induction se comporte de la même manière entre le calcul analytique et la simulation.

8.1.2 Essai en position minimale et maximale

Le rotor est ensuite placé en position minimale et maximale afin de relever la gamme de variation de tension :

	Position du rotor 0°			Position du rotor 90°		
	Calcul	Simulation	Erreur [%]	Calcul	Simulation	Erreur [%]
U_{L1-N} [V] (réseau)	230	230	0,0	230	230	0,0
U_{L1-U} [V] (induite)	234,5	233	0,6	234,5	233	0,6
U_{U-N} [V] (sortie)	4,5	3,1	45,2	464,5	462	0,5
I_{réseau} [A]	8,37	8,83	5,2	8,37	8,83	5,2
Angle U_{réseau}-U_{induite} [°]	0	0	0,0	180	180	0,0
Angle U_{réseau}-U_{sortie} [°]	180	180	0,0	0	0	0,0
Angle U_{induite}-U_{sortie} [°]	180	180	0,0	180	180	0,0
P_{réseau} [kW]	0,78	0,87	10,2	0,78	0,85	8,3
Q_{réseau} [kVar]	5,72	6,03	5,1	5,72	6,03	5,2
S_{réseau} [kVA]	5,77	6,09	5,2	5,77	6,09	5,2
cos(phi)_{réseau}	0,13	0,143	9,1	0,13	0,14	7,1

Tableau 26 : Tableau comparatif des résultats de simulation et du calcul analytique pour la mesure à vide en position maximale et minimale

Les résultats de calcul et de simulation correspondent bien. Il y a une différence de 1.5 [V] sur la tension de sortie en position minimale et 2.5 [V] en position maximale. La puissance consommée par la machine est 5% plus élevée lors de la simulation.

La tension de phase en sortie à vide peut varier de 4.5 à 464.5 pour le modèle analytique et entre 3.1 et 462 pour la simulation par éléments finis.

8.1.3 Comportement magnétique

La répartition du champ B à vide dans la machine est représentée à la figure suivante :

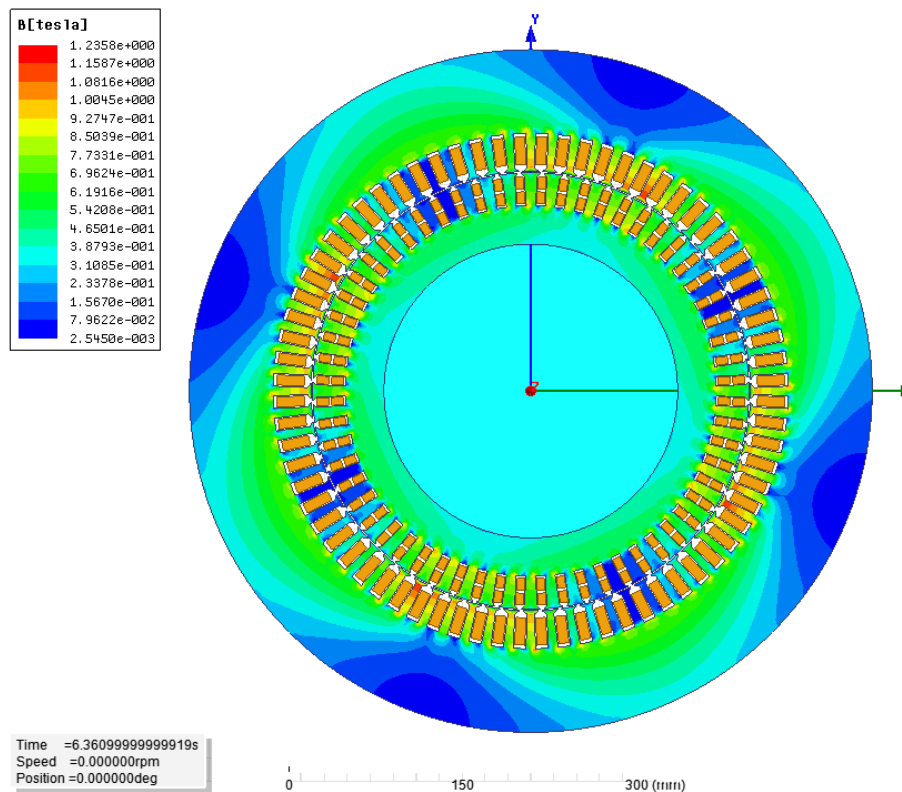


Figure 61 : Champ magnétique B dans le régulateur à induction lors d'un essai à vide

A vide, une dent du pôle est un peu plus saturée que les autres (1.26 [T]). Dans la configuration d'origine, le champ B maximum dans une dent était de 1.88 [T]. Cela peut avoir une influence sur la résistance fer, cette hypothèse sera vérifiée lors des mesures.

L'inductance de champ principal obtenue par simulation est de :

$$L_h = 81[\text{mH}]$$

$$X_h = 25.44[\Omega]$$

8.2 Essai en court-circuit

Un test avec la sortie du régulateur à induction en court-circuit est réalisé. Premièrement le rotor est placé en position minimale avec la tension d'alimentation. Puis il est placé en position maximale avec une tension d'alimentation réduite afin d'obtenir un courant raisonnable.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

	Position du rotor 0°			Position du rotor 90°		
	Calcul	Simulation	Erreur [%]	Calcul	Simulation	Erreur [%]
U_{L1-N} [V]	230	230	0,0	15	15	0,0
I_{reseau} [A]	8,4	9,07	7,4	34,5	32,1	7,5
I_{rotor} [A]	2,9	2,12	36,8	16,8	15,62	7,6
I_{stator} [A]	10,9	10,67	2,2	17,7	16,5	7,3
Angle I_{reseau}-I_{stator} [°]	0	0	0,0	0	0	0,0
Angle I_{reseau}-I_{rotor} [°]	180	186	3,2	0	0	0,0
Angle I_{stator}-I_{rotor} [°]	180	186	3,2	0	0	0,0
P_{reseau} [kW]	0,78	0,84	7,7	0,2	0,21	3,2
Q_{reseau} [kVar]	5,75	6,20	7,3	1,54	1,43	7,7
S_{reseau} [kVA]	5,8	6,26	7,3	1,55	1,44	7,3
cos(phi)_{reseau}	0,13	0,135	3,7	0,13	0,143	9,1

Tableau 27 : Tableau comparatif des résultats de simulation et du calcul analytique pour la mesure en court-circuit en position maximale et minimale

Les résultats de la simulation et du calcul donnent des résultats semblables. En position minimale, il y a une différence de l'angle du courant dans le rotor de 6°. Dans l'ensemble, il y a une erreur d'environ 8%, cela est parfaitement acceptable étant donné qu'il s'agit de deux méthodes différentes.

8.3 Charge ohmique

Un essai sur le chauffage de 28.8 [Ω] est réalisé. La tension de sortie est réglée afin d'avoir la tension nominale sur le chauffage. Cela correspond à un angle du rotor de 28.5° pour une tension de ligne en sortie de 380 [V].

Le tableau suivant montre le comparatif entre calcul et simulation pour cet essai :

Essai charge ohmique - 28,8[Ohm] : position du rotor 28,5°

		Calcul	Simulation	Erreur [%]
	U_{L1-N} [V] (réseau)	230	230	0,0
	U_{L1-U} [V] (induite)	221,5	218,3	1,5
	U_{U-N} [V] (sortie)	219,5	217,4	1,0
	I_{réseau} [A]	12,16	12,6	3,5
	I_{rotor} [A]	7,62	7,64	0,3
	I_{stator} [A]	15,93	16,34	2,5
Réseau	P [kW]	5,84	5,91	1,2
	Q [kVar]	6,03	6,37	5,4
	S [kVA]	8,4	8,7	3,4
	cos(phi)	0,7	0,68	2,9
Stator	P [kW]	3,13	2,71	15,7
	Q [kVar]	10,54	10,95	3,7
	S [kVA]	11	11,3	2,4
	cos(phi)	0,28	0,24	16,7
Rotor coté réseau	P [kW]	3,13	2,85	10,0
	Q [kVar]	-4,51	-4,44	1,6
	S [kVA]	5,26	5,27	0,2
	cos(phi)	0,52	0,54	3,7
Rotor coté charge	P [kW]	5,02	4,98	0,7
	Q [kVar]	0	0	0,0
	S [kVA]	5,02	4,98	0,7
	cos(phi)	1	1	0,0

Tableau 28 : Tableau comparatif des résultats de simulation et du calcul analytique pour la mesure avec charge ohmique de 28.8 [Ω]

En plaçant le rotor à cette position, la tension de phase de sortie est différente d'environ 3.2 [V]. Le courant consommé par la machine simulée est légèrement supérieur à celui calculé. La puissance active consommée au stator est inférieure de 16% lors de la simulation. Dans l'ensemble les résultats correspondent.

Le $\cos(\varphi)$ au réseau se situe vers 0.7. Le rendement de la machine dans cette configuration est de 85%.

Le couple de la machine lors de la simulation est de 11.75 [Nm]. Le couple calculé selon le chapitre 2.3.4 donne un couple de 13.95 [Nm].

La puissance réactive capacitive au rotor du côté réseau sera expliquée plus tard dans le rapport.

8.3.1 Variation de l'angle

Des essais sont réalisés avec cette charge, le régulateur à induction est branché avec une tension d'alimentation phase/neutre de 230 [V] et l'angle du rotor de la machine est varié entre 0° et 90°. Les essais sont réalisés à l'aide du modèle analytique. Ce test est effectué afin de constater l'évolution des puissances et des courants de la machine en fonction de l'angle du rotor.

Le résultat est présenté dans le tableau suivant :

Phi [°]	U _{alim} [V]	I _{reseau} [A]	U _{load} [V]	I _{load} [A]	I _{stator} [A]	Puissance totale alimentation			cos(phi)	Rendement [%]
						P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]		
0	230	8,4	4,4	0,2	8,4	0,78	5,72	5,77	0,14	0,3
5	230	8,4	41,0	1,4	9,8	0,95	5,73	5,81	0,16	18,3
10	230	8,6	80,1	2,8	11,2	1,45	5,76	5,94	0,24	46,0
15	230	9,1	119,2	4,1	12,6	2,27	5,81	6,24	0,36	65,2
20	230	9,8	157,4	5,5	13,9	3,38	5,88	6,78	0,50	76,3
25	230	11,1	194,5	6,8	15,1	4,75	5,97	7,63	0,62	82,9
30	230	12,7	230,0	8,0	16,3	6,33	6,07	8,77	0,72	87,1
35	230	14,7	263,9	9,2	17,3	8,09	6,17	10,18	0,79	89,7
40	230	17,1	295,7	10,3	18,2	9,95	6,29	11,77	0,85	91,5
45	230	19,6	325,2	11,3	19,0	11,89	6,41	13,50	0,88	92,7
50	230	22,1	352,3	12,2	19,7	13,81	6,52	15,28	0,90	93,6
55	230	24,6	376,7	13,1	20,2	15,68	6,64	17,03	0,92	94,3
60	230	27,1	398,3	13,8	20,6	17,44	6,75	18,70	0,93	94,8
65	230	29,3	416,8	14,5	20,8	19,20	6,85	20,39	0,94	94,2
70	230	31,2	432,1	15,0	20,9	20,39	6,93	21,54	0,95	95,4
75	230	32,7	444,2	15,4	20,8	21,50	7,00	22,61	0,95	95,6
80	230	33,9	452,9	15,7	20,6	22,32	7,05	23,41	0,95	95,7
85	230	34,6	458,1	15,9	20,2	22,82	7,08	23,89	0,96	95,8
90	230	34,9	459,8	16,0	19,7	22,99	7,10	24,06	0,96	95,8

Tableau 29 : Tableau des résultats de calcul analytique pour une charge ohmique

Les résultats sont traités de manière graphique aux figures suivantes. La puissance coté réseau est illustrée :

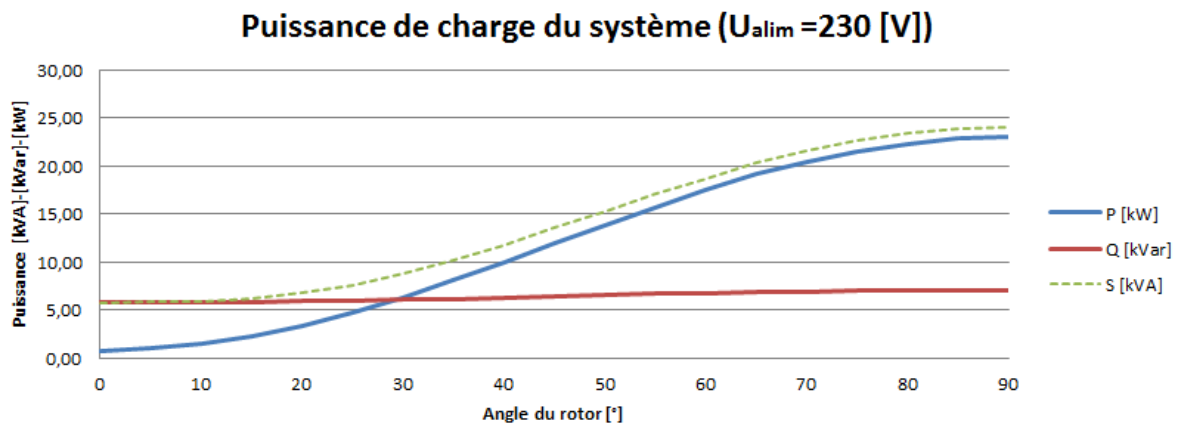


Figure 62 : Evolution des puissances dans le régulateur à induction pour une charge ohmique

La puissance réactive est sous forme de ruban. Elle est présente à cause de l'inductance de champ principal et les inductances de fuite de la machine. La puissance active augmente avec l'angle du régulateur à induction.

L'évolution du cos(ϕ) est représenté sur le graphique suivant :

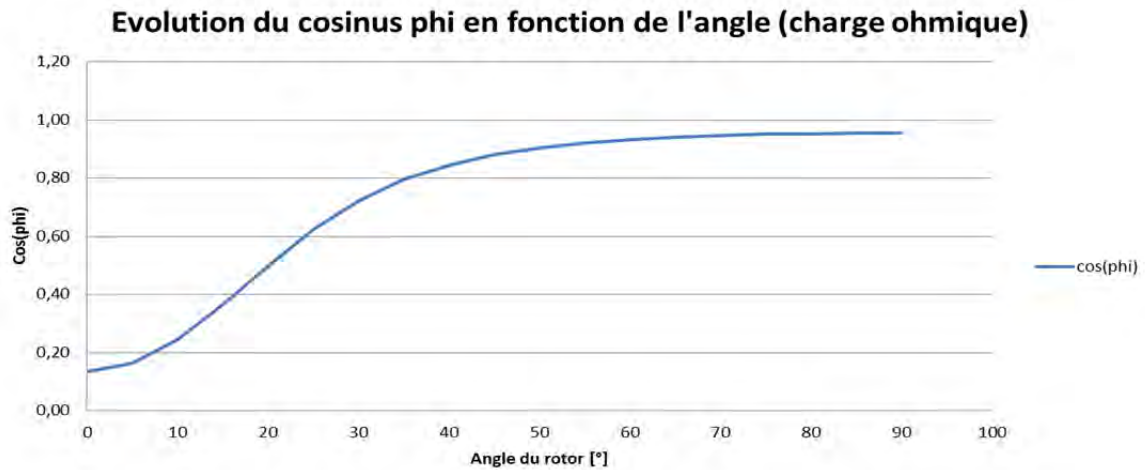


Figure 63 : Evolution du $\cos(\varphi)$ dans le régulateur à induction pour une charge ohmique

Le $\cos(\varphi)$ évolue en fonction de l'angle du rotor. A tension maximale il vaut 0.96 et à tension minimale il vaut 0.14. A la tension nominale du chauffage, il est égal à 0.72.

Le rendement de la machine en fonction de l'angle est représenté à la figure suivante.

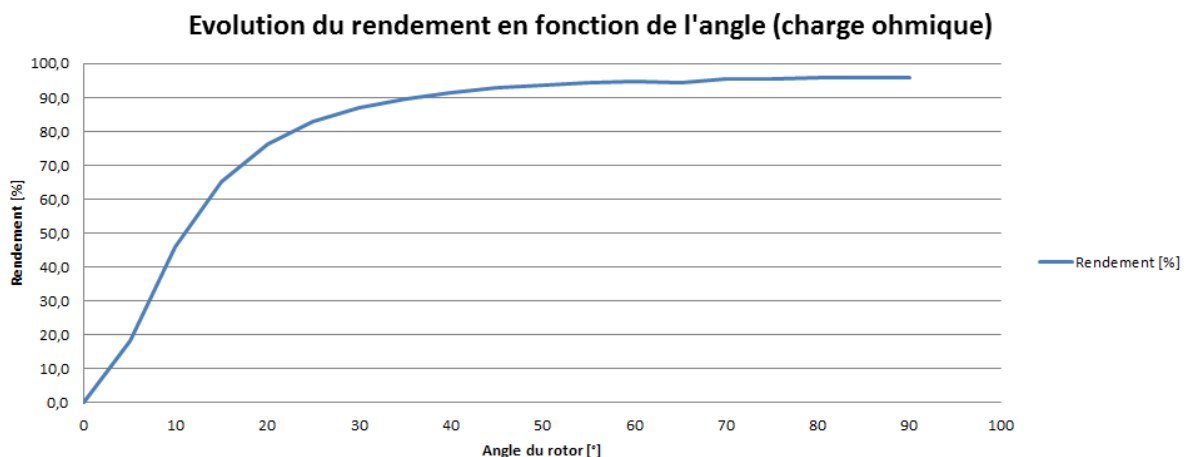


Figure 64 : Evolution du rendement dans le régulateur à induction pour une charge ohmique

Plus la tension augmente, plus le rendement du régulateur à induction augmente. Cela s'explique par le fait que la puissance réactive de la machine évolue très peu avec l'angle de la machine (ruban : Figure 62).

8.4 Charge inductive

Un essai est réalisé sur une charge inductive représentant un moteur asynchrone à vide. Il se base sur une machine qui a été bobinée à neuf dans les ateliers de Valélectric. Ce test permet de voir le comportement du régulateur à induction dans la configuration dans laquelle il sera utilisé.

8.4.1 Représentation du moteur électrique

Il s'agit d'un moteur asynchrone Siemens de 75 [kW], 400 [V] Δ , 126 [A], 2900 [tr/min]. La machine tournant à vide lors d'un essai est représentée par son inductance champ princi-

pal. Les dimensions et caractéristiques de la machine étant connues, l'inductance de champ principal se calcule de la manière suivante :

$$L_h = \frac{24}{\pi} \cdot \frac{N^2}{p \cdot \delta} \cdot l \cdot \tau_p \cdot 10^{-7} = \frac{24}{\pi} \cdot \frac{42^2}{1 \cdot 1.5} \cdot 0.275 \cdot \frac{\pi \cdot 0.235}{4} \cdot 10^{-7} = 45[mH]$$

$$\underline{X_h} = j \cdot L_h \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = j \cdot 0.045 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = j \cdot 14.32[\Omega]$$

Les pertes par frottements et ventilations ainsi que la résistance du bobinage ne sont pas prisent en compte. Cette méthode permet d'avoir un ordre d'idée global.

8.4.2 Comparaison entre calcul analytique et simulation

L'alimentation du régulateur à induction est branchée à une tension de phase de 230 [V]. L'angle du régulateur à induction est fixé afin d'obtenir une tension de sortie de phase de 230 [V]. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Essai charge inductive j*14,32 : position du rotor 32°

	Calcul	Simulation
U_{L1-N} [V] (réseau)	230	230
U_{L1-U} [V] (induite)	222,3	220
U_{U-N} [V] (sortie)	231,01	228,4
I_{réseau} [A]	26,53	28,3
I_{rotor} [A]	16,13	17
I_{stator} [A]	21,66	23,5
Angle U_{réseau}-U_{induite} [°]	57,5	63
Angle U_{réseau}-U_{sortie} [°]	61,4	54
Angle U_{induite}-U_{sortie} [°]	118,9	117
Angle I_{réseau}-I_{stator} [°]	38	37,8
Angle I_{réseau}-I_{rotor} [°]	54,4	56,25
Angle I_{stator}-I_{rotor} [°]	92,4	94,05
Réseau	P [kW]	0,96
	Q [kVar]	18,3
	S [kVA]	18,3
	cos(phi)	0,05
Stator	P [kW]	-8,44
	Q [kVar]	12,3
	S [kVA]	14,94
	cos(phi)	0,57
Rotor coté réseau	P [kW]	9,41
	Q [kVar]	5,96
	S [kVA]	11,1
	cos(phi)	0,84
Rotor coté charge	P [kW]	0
	Q [kVar]	11,2
	S [kVA]	11,2
	cos(phi)	0

Tableau 39 : Tableau comparatif des résultats de simulation et du calcul analytique pour la mesure avec charge inductive de j14.32 [Ω]

En plaçant le rotor à cette position, la tension de phase de sortie est différente d'environ 2.6 [V]. Le courant consommé par la machine simulée est légèrement supérieur à celui calculé de 8% au maximum pour le stator. Le cos(φ) au réseau est proche de 0. Dans l'ensemble les résultats correspondent.

Le couple de la machine lors de la simulation est de 56 [Nm]. Le couple calculé selon le chapitre 2.4.4 donne un couple de 57.86 [Nm].

La puissance active négative au stator sera expliquée plus tard dans le rapport.

8.4.3 Comportement du régulateur à induction

Le régulateur à induction est branché avec une tension d'alimentation phase/neutre de 230 [V] et l'angle de rotation de la machine est varié entre 0° et 90°. L'essai est réalisé à l'aide du modèle analytique. Ce test permet de constater le comportement (puissances, courants, tensions) de la machine avec l'utilisation d'une charge inductive.

Le résultat du calcul analytique est présenté dans le tableau suivant :

Phi [°]	Ualim [V]	Ireseau [A]	Uload [V]	Iload [A]	Istator [A]	Puissance totale alimentation			cos(phi)
						P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]	
0	230	8,4	4,0	0,3	8,6	0,78	5,72	5,78	0,14
5	230	8,8	36,3	2,6	8,9	0,79	6,02	6,07	0,13
10	230	10,1	71,9	5,1	10,3	0,79	6,94	6,98	0,11
15	230	12,3	107,0	7,5	12,3	0,82	8,42	8,45	0,10
20	230	15,2	141,4	10,0	14,6	0,85	10,42	10,45	0,08
25	230	18,7	174,6	12,3	17,1	0,88	12,90	12,93	0,07
30	230	22,9	206,6	14,5	19,6	0,92	15,76	15,79	0,06
35	230	27,5	237,0	16,7	22,2	0,97	18,41	18,44	0,05
40	230	32,4	265,5	18,7	24,6	1,02	22,32	22,34	0,05
45	230	37,4	292,1	20,6	26,8	1,07	25,81	25,83	0,04
50	230	42,5	316,4	22,3	28,9	1,12	29,30	29,32	0,04
55	230	47,4	338,3	23,8	30,8	1,16	32,68	32,70	0,04
60	230	52,0	357,7	25,2	32,6	1,21	35,86	35,88	0,03
65	230	56,1	374,3	26,4	34,1	1,25	38,72	38,74	0,03
70	230	59,7	388,1	27,3	35,3	1,29	41,12	41,14	0,03
75	230	62,6	398,9	28,1	36,3	1,31	43,20	43,22	0,03
80	230	64,8	406,7	28,6	37,1	1,33	44,69	44,71	0,03
85	230	66,1	411,4	29,0	37,5	1,35	45,59	45,61	0,03
90	230	66,5	412,9	29,1	37,7	1,35	45,89	45,91	0,03

Tableau 30 : Tableau des résultats du calcul analytique pour une charge ohmique

Les résultats sont traités de manière graphique aux figures suivantes. La puissance coté réseau est illustrée :

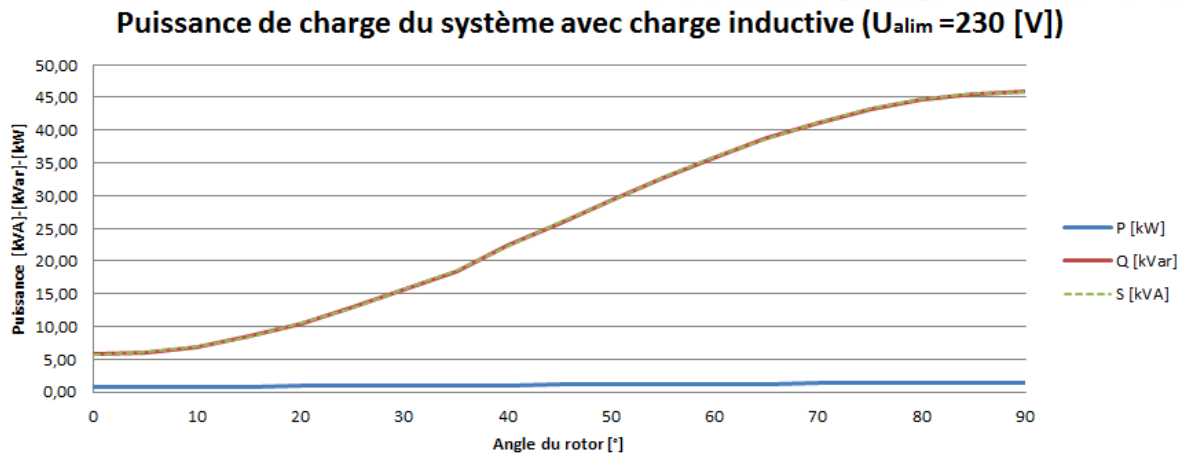


Figure 65 : Graphique de l'évolution des puissances pour une charge inductive

La puissance active de la machine est très faible. Il s'agit principalement des pertes fer et cuivre dans le régulateur à induction. Le reste est de la puissance réactive. L'évolution du $\cos(\varphi)$ est représentée à la figure suivante :

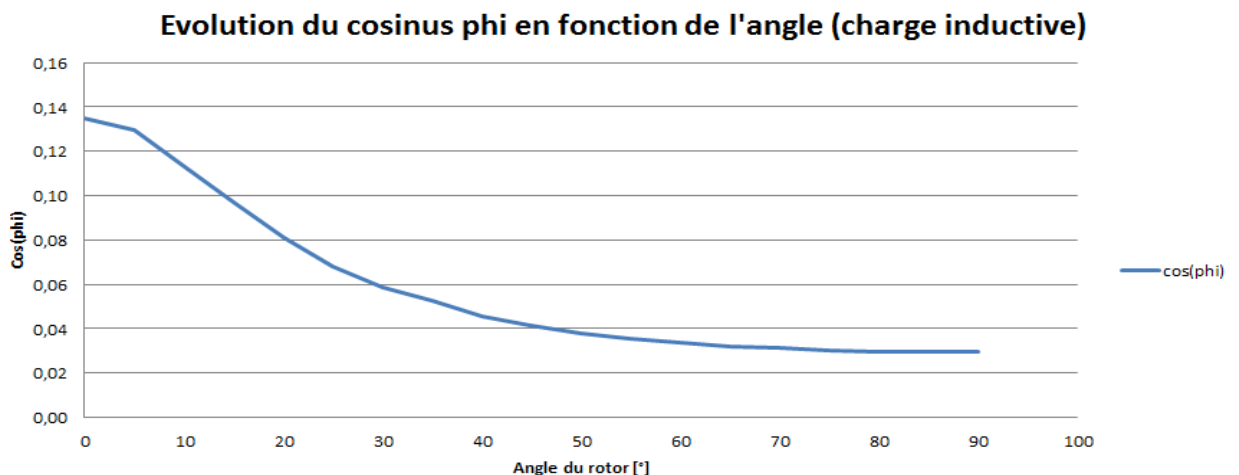


Figure 66 : Graphique de l'évolution du $\cos(\varphi)$ pour une charge inductive

Le $\cos(\varphi)$ lors d'un essai d'une machine à induction sera toujours inductif et inférieur à 0.14. Pour la tension nominale de la machine, il vaut 0.06.

8.5 Utilisation du régulateur comme charge pour génératrice

Valélectric révisé régulièrement des génératrices. Afin de les tester, elles sont entraînées à l'aide d'un moteur, puis chargées à l'aide du chauffage de 5 [kW]. Le problème est que bien souvent cette charge ne suffit pas.

L'idée serait de charger la génératrice à l'aide du régulateur à induction avec sa sortie placée en court-circuit. Le schéma suivant illustre la situation :

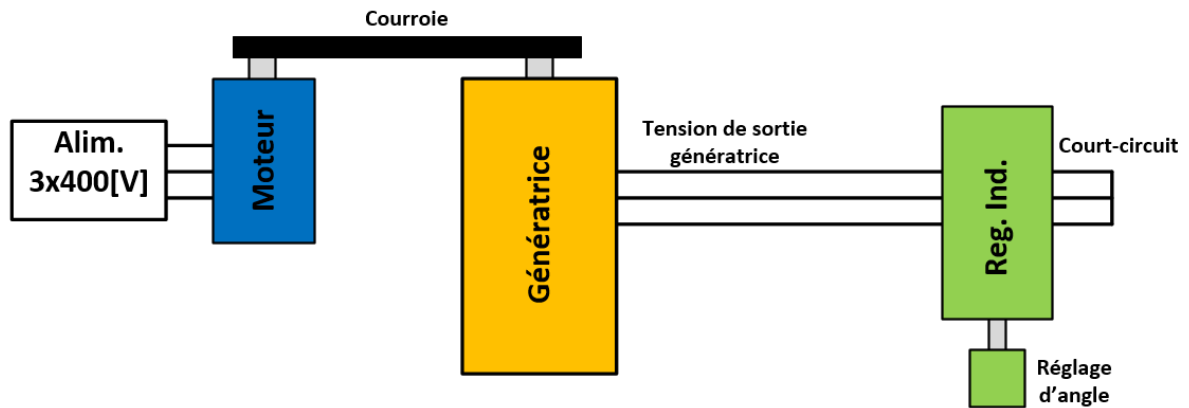


Figure 67 : Schéma d'utilisation du régulateur à induction comme charge pour génératrice

Le courant de court-circuit du régulateur à induction dépend fortement de son angle.

Des essais sont réalisés avec la sortie du régulateur à induction en court-circuit. La machine est branchée avec une tension d'alimentation phase/neutre de 230 [V] et l'angle de rotation de la machine est varié entre 0° et 90°.

Phi [°]	Ualim [V]	Ireseau [A]	Puissance totale alimentation			cos(phi)	Z [Ω]	R [Ω]	X _L [Ω]	L [mH]
P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]								
0	230	8,4	0,78	5,75	5,80	0,13	27,35	3,68	27,10	86,3
5	230	12,4	1,14	8,45	8,53	0,13	18,59	2,49	18,43	58,7
10	230	24,1	2,20	16,50	16,65	0,13	9,54	1,26	9,46	30,1
15	230	43,3	3,93	29,60	29,86	0,13	5,31	0,70	5,27	16,8
20	230	69,3	6,38	47,40	47,83	0,13	3,32	0,44	3,29	10,5
25	230	101,4	9,19	69,35	69,96	0,13	2,27	0,30	2,25	7,2
30	230	138,6	12,55	94,77	95,60	0,13	1,66	0,22	1,65	5,2
35	230	179,7	16,30	122,90	123,98	0,13	1,28	0,17	1,27	4,0
40	230	223,5	20,20	152,88	154,21	0,13	1,03	0,13	1,02	3,2
45	230	268,7	24,30	183,80	185,40	0,13	0,86	0,11	0,85	2,7
50	230	313,9	28,40	214,71	216,58	0,13	0,73	0,10	0,73	2,3
55	230	357,0	32,40	244,70	246,84	0,13	0,64	0,08	0,64	2,0
60	230	398,0	36,00	272,80	275,17	0,13	0,58	0,08	0,57	1,8
65	230	453,0	39,40	298,23	300,82	0,13	0,51	0,07	0,50	1,6
70	230	468,0	42,34	320,20	322,99	0,13	0,49	0,06	0,49	1,6
75	230	494,1	44,70	337,98	340,92	0,13	0,47	0,06	0,46	1,5
80	230	513,3	46,43	351,10	354,16	0,13	0,45	0,06	0,44	1,4
85	230	525,0	47,50	359,13	362,26	0,13	0,44	0,06	0,43	1,4
90	230	528,0	47,85	361,83	364,98	0,13	0,44	0,06	0,43	1,4

 Temps d'essai inférieur à 2 minutes (échauffement adiabatique supérieur à 150°)

Tableau 31 Tableau des résultats de calcul analytique en utilisant le régulateur comme charge

Dans cette configuration, et en ne prenant pas en compte les limites de l'alimentation, il est possible de charger une génératrice avec 140 [A] durant 2 minutes avec un $\cos(\varphi)$ de 0.13. La machine ne supporte pas des valeurs plus hautes à causes du manque d'évacuation de la chaleur.

La courbe de puissance de charge est présentée à la figure suivante :

Puissance de charge du système ($U_{\text{alim}} = 230 \text{ [V]}$)

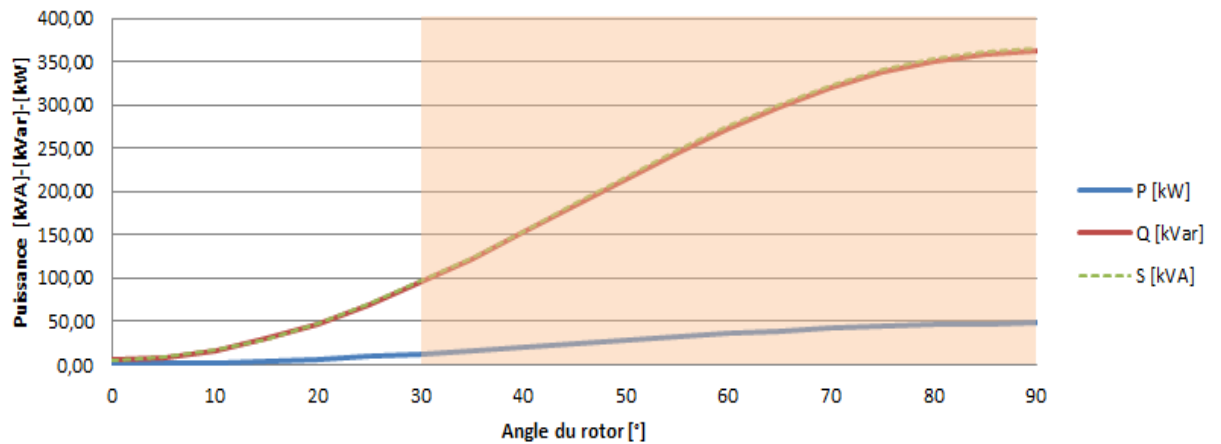


Figure 68 : Courbe de puissance de charge du régulateur à induction

Du côté alimentation, le régulateur à induction en court-circuit peut être vu comme inductance variable.

Inductance équivalente du système en charge

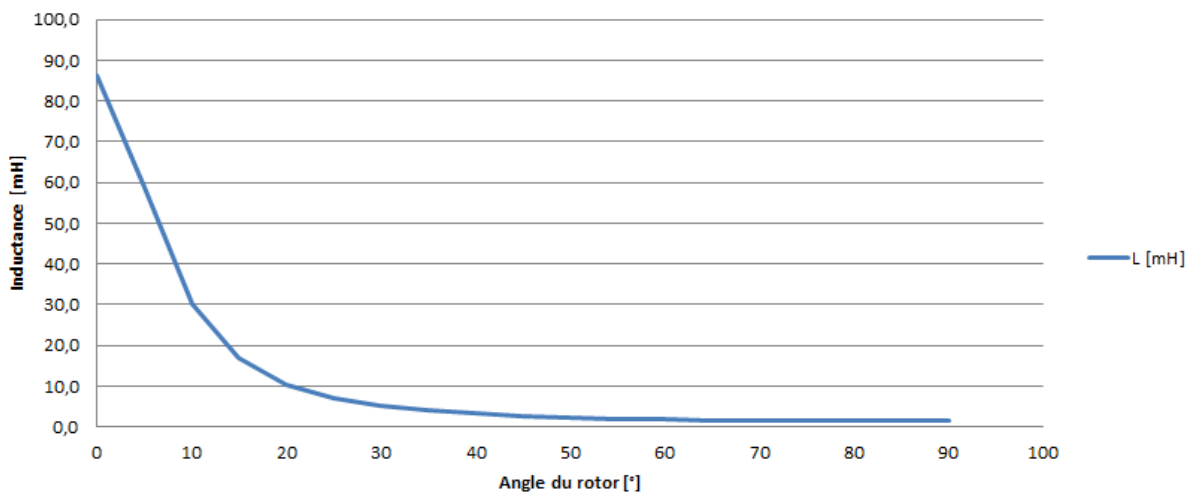


Figure 69 : Valeur de l'inductance équivalente du régulateur à induction en court-circuit

Compte tenu de ces résultats, il sera possible d'utiliser le régulateur à induction comme charge pour tester une génératrice. Les protections nécessaires devront être prises pour surveiller la température des enroulements et des câbles pour ne pas détruire la machine.

9 REMISE A NEUF DU REGULATEUR A INDUCTION

Ce chapitre porte sur les aspects plus pratiques, tel que : le bobinage selon le choix effectué au chapitre 7, les étapes de la remise à neuf, le temps de remise à neuf et les coûts que cela engendre.

9.1 Bobinage

Une fois l'ancien bobinage enlevé et la machine nettoyée, les tôles du rotor et du stator sont peintes à l'aide d'un vernis de protection isolant.



Figure 70 : Bobinage à neuf : vernis de protection isolant

L'intérieur des encoches est ensuite isolé à l'aide de deux épaisseurs d'isolant.

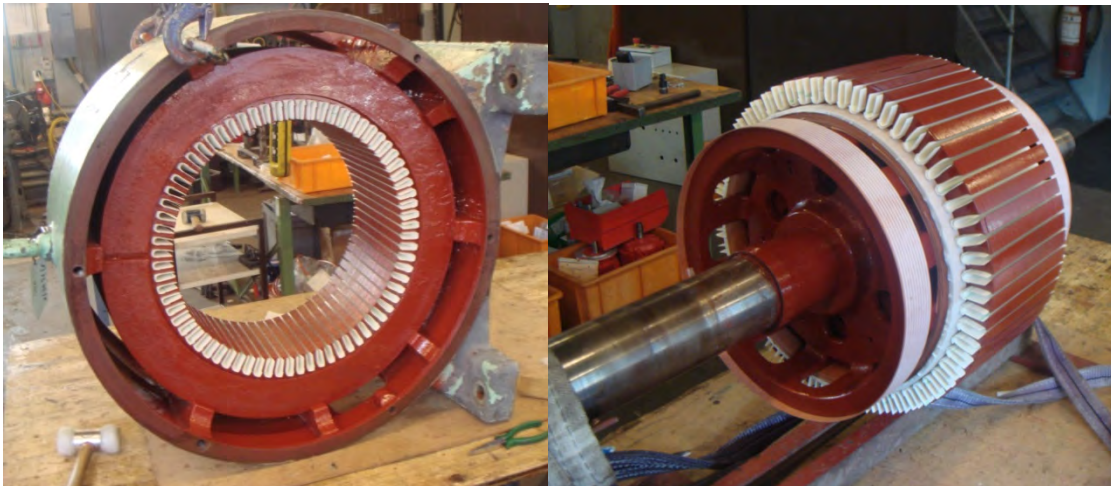


Figure 71 : Bobinage à neuf : isolation des encoches

Les points suivants traitent de la procédure de bobinage du stator. Les bobines composées de 10 conducteurs sont fabriquées à l'aide d'un gabarit de tournage :

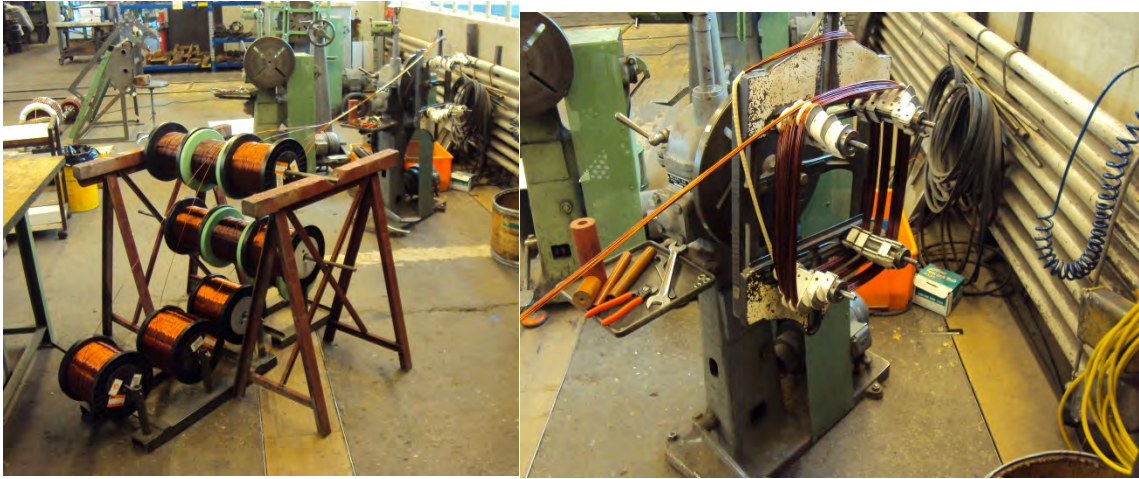


Figure 72 : Bobinage à neuf : formation des bobines

Les bobines sont progressivement insérées dans les encoches. Chaque encoche est fermée à l'aide d'un isolant :

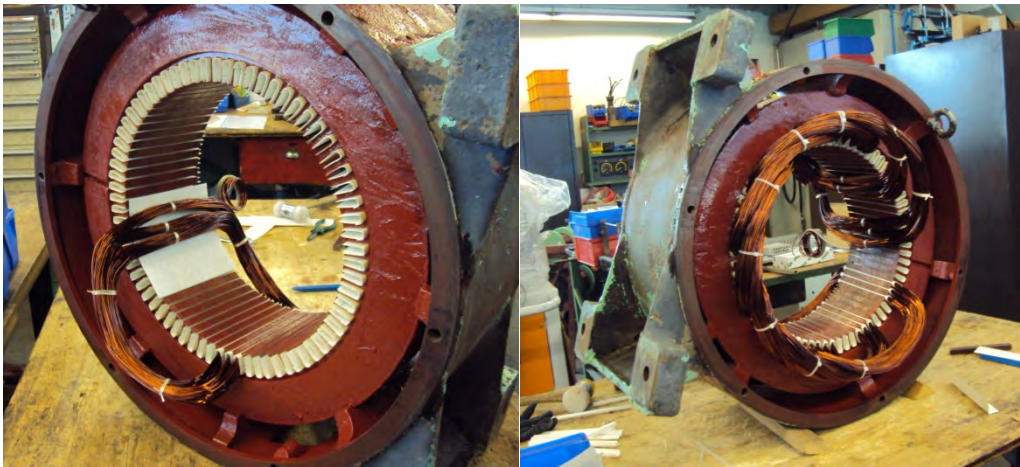


Figure 73 : Bobinage à neuf : insertion des bobines

Les bobines de chaque phase sont isolées entre elles à l'aide d'un papier isolant, puis les têtes de bobines sont formées :

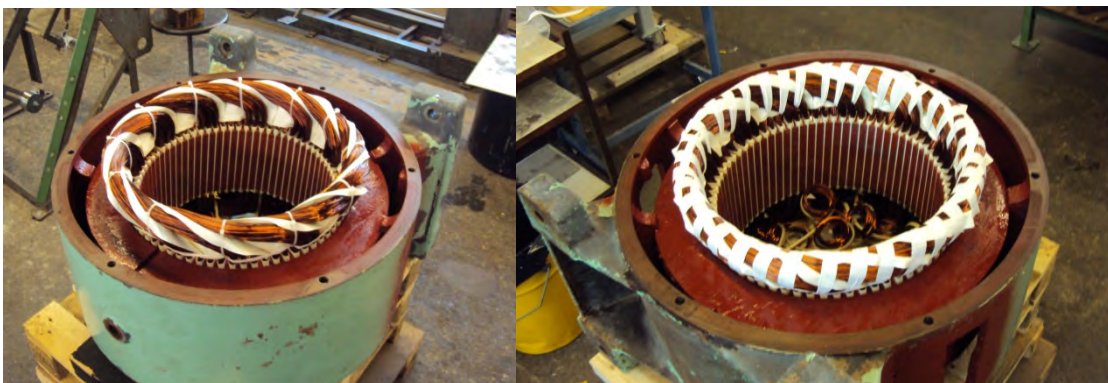


Figure 74 : Bobinage à neuf : formation des têtes de bobines

Les connexions entre les différentes bobines sont effectuées (mise en série). Enfin, la seconde tête de bobine est formée :

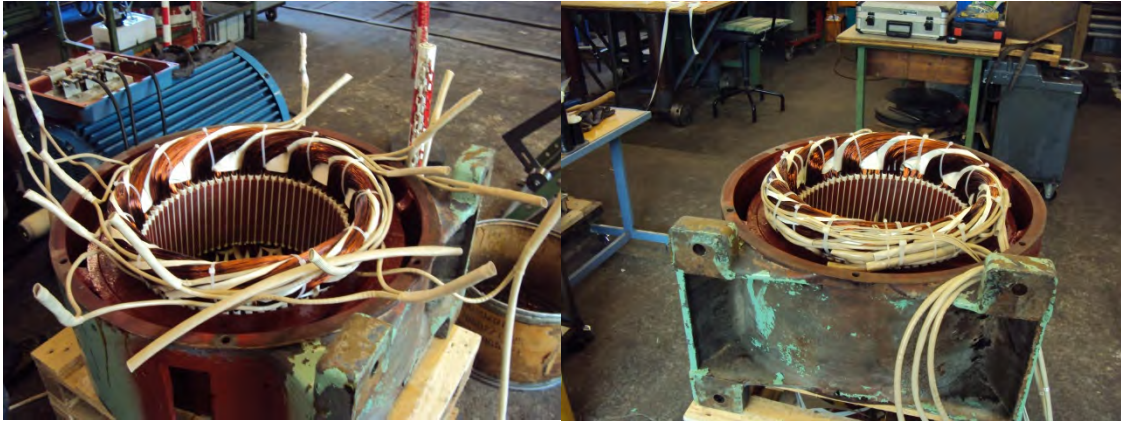


Figure 75 : Bobinage à neuf : connexion des bobines

Une sonde PTC (135°) prévue pour une alarme et une sonde PT100 pour suivre l'évolution de la température sont posées.

La même procédure est effectuée pour le bobinage du rotor :

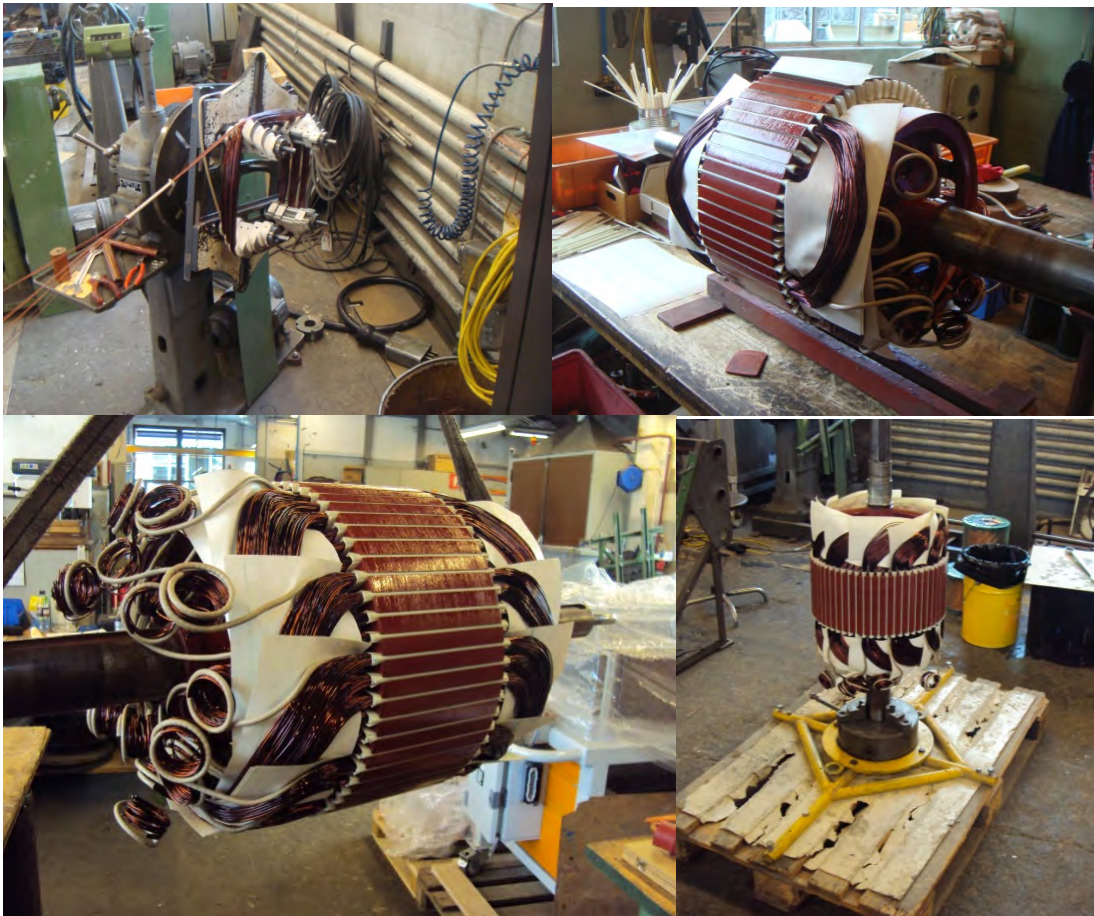


Figure 76 : Bobinage à neuf : bobinage du rotor



Figure 77: Bobinage à neuf : bobinage du rotor

Après le bobinage, la machine est placée dans un four à 800° durant une nuit afin d'évacuer l'humidité restante (papier isolant). Le tout est ensuite imprégné puis replacé au four afin de durcir l'ensemble. Le produit se situant sur les parties de l'entrefer est gratté afin d'assurer le montage mécanique.



Figure 78 : Bobinage à neuf : rotor après imprégnation et grattage

Enfin la machine est vernie à l'aide d'un vernis isolant rouge.



Figure 79 : Bobinage à neuf : rotor après imprégnation et grattage

La machine à induction est désormais prête pour le montage.

9.2 Révision de la ventilation

La ventilation forcée a été nettoyée, sablée puis remontée. Le moteur d'entraînement a été révisé, nettoyé et imprégné :



Figure 80 : Remise à neuf : ventilation

Les caractéristiques du moteur d'entraînement sont les suivantes : 735 [W], 380 [V] Y, 2 [A], 935 [tr/min], 50 [Hz].

9.3 Révision du réducteur

Le réducteur permettant le blocage du rotor est révisé. Pour cela, il est complètement démonté et nettoyé. Les roulements et les joints ont été changés et remplacés par des neufs.

La plaque signalétique du moteur et du réducteur est présentée à la figure suivante :

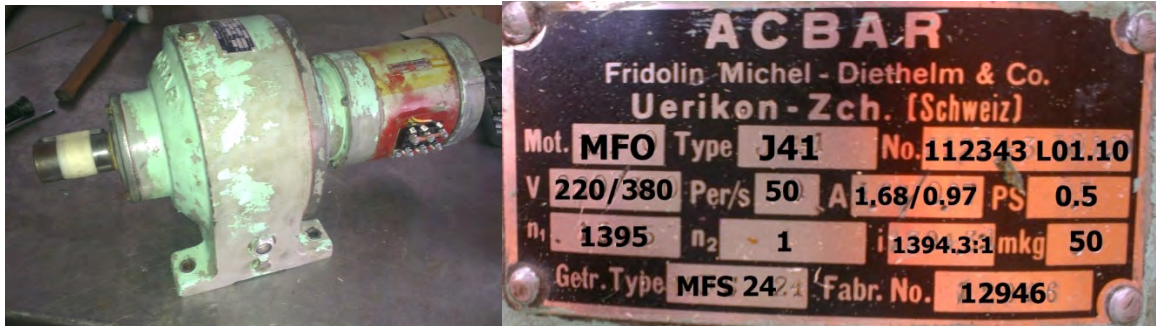


Figure 81 : Plaque signalétique du réducteur et du moteur de réglage de l'angle

Le moteur de réglage d'angle a les caractéristiques suivantes : 367.5 [W], 220/380 [V], 1.68/0.97 [A], 50 [Hz], 1395 [tr/min].

Le rapport de réduction est de 1394.3 :1. Il s'agit d'un réducteur irréversible dont le couple maximum est de 50 [mkg] soit **490.5 [Nm]**. C'est un réducteur très compact avec un grand rapport de réduction.

Le couple maximal du réducteur est très grand et permet sans problème le blocage de l'axe du rotor.

Les images du montage sont présentées aux images suivantes :



Figure 82 : Révision du réducteur de réglage de l'angle

Le schéma de principe mécanique du réducteur est représenté à la figure suivante :

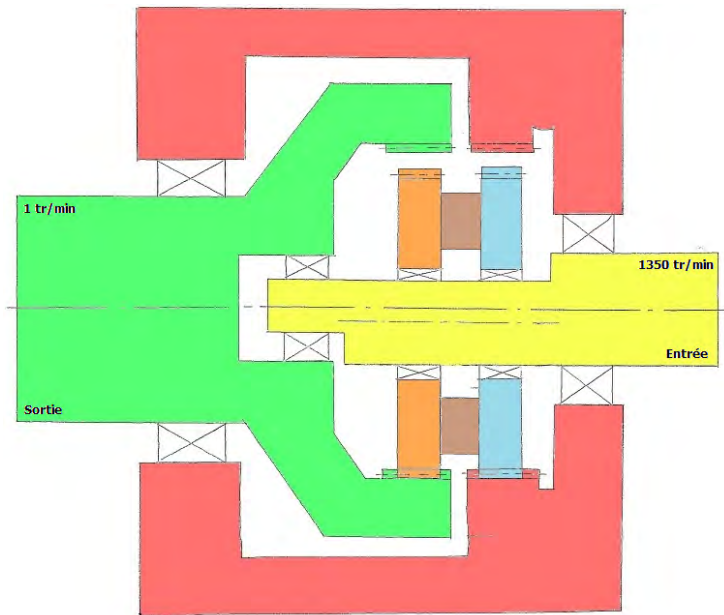


Figure 83 : Principe de mécanique du réducteur

Le rapport de réduction de 1350 :1 dans un système autant compact provient du fait que les engrenages sont décentrés par rapport à l'axe d'entrée.

L'arbre d'entrée (jaune) entraîne par le biais d'un excentrique l'engrenage bleu. Grâce à la couronne présente dans le carter (rouge), ce dernier tourne sur lui-même et entraîne l'engrenage orange. Celui-ci étant aussi sur l'excentrique d'entrée entraîne l'arbre de sortie (vert) via la couronne de sortie.

9.4 Montage de la machine

La machine à induction est montée. Pour cela le rotor est inséré dans le stator.

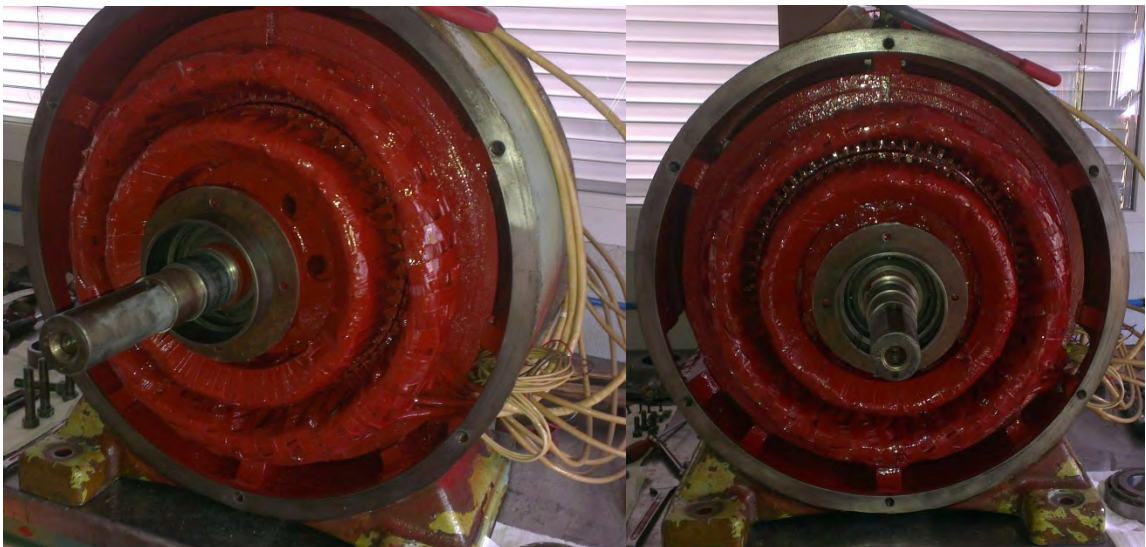


Figure 84 : Remise à neuf : montage de la machine à induction

Les nouveaux roulements et les flasques sont ensuite montés.



Figure 85 : Remise à neuf : montage de la machine à induction

Toutes les parties sont ensuite assemblées sur le châssis :

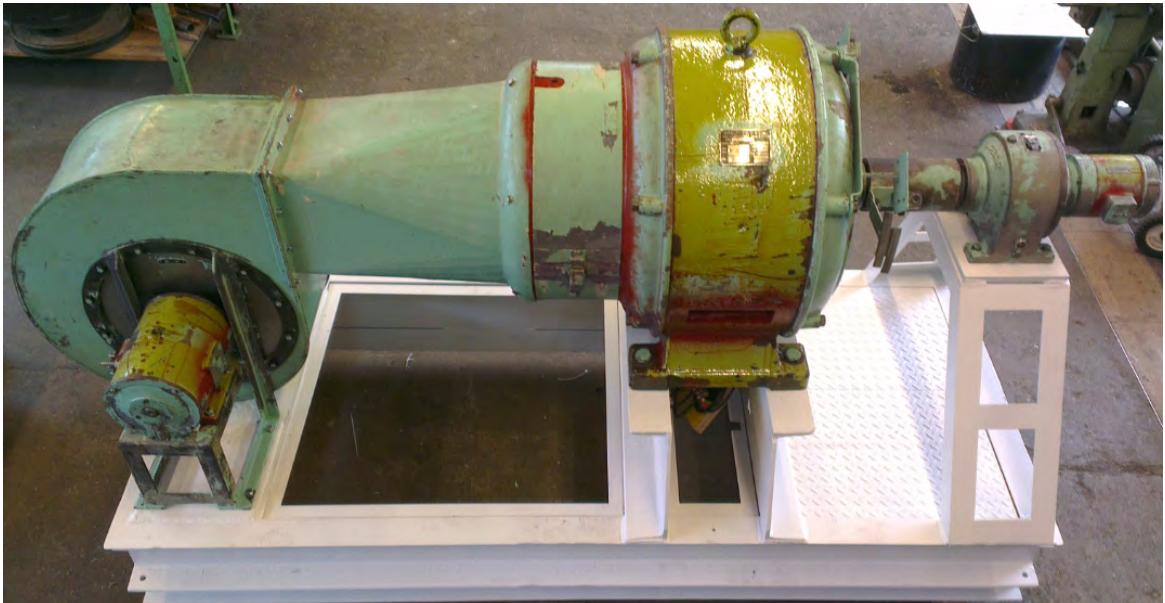


Figure 86 : Remise à neuf : montage de la machine terminé

La machine sera peinte une fois les mesures et le travail de diplôme terminé.

9.5 Temps de remise en état

La remise à neuf du régulateur à induction a duré 5 semaines. Le tableau suivant résume le temps et le prix de revient pour la remise à neuf du régulateur à induction :

Description	Temps [h]	Prix
Temps personnel : démontage	42	2100
Temps personnel : bobinage	50	2500
Temps personnel : montage à neuf	70	3500
Matériel de remise à neuf	-	2000
Total		10100

Tableau 32 : Temps de remise à neuf du régulateur à induction

L'heure du personnel a été comptée à 50 CHF. Il s'agit du prix coûtant à l'entreprise pour un employé en prenant en compte le salaire, les cotisations et les assurances.

Le temps de démontage englobe : démontage de la ventilation, démontage du réducteur, démontage de la machine à induction, élimination de l'ancien bobinage, nettoyage et vernissage de l'intérieur de la machine.

Le temps de bobinage comprend : isolation des encoches, bobinage de la machine, soudure pour la mise en série des bobines, test par onde de choc et imprégnation des bobines.

Le temps de montage à neuf inclut : révision du réducteur, révision de la ventilation, montage de la machine à induction, assemblage de la totalité, remise à neuf des boîtes à bornes et peinture de la machine.

Le matériel nécessaire à la remise à neuf est le suivant : câble de bobinage, matériel d'isolation, roulements de la machine à induction, roulement du réducteur et sablage du châssis.

10 ESSAI SUR LE REGULATEUR REMIS A NEUF

Dans ce chapitre les essais réalisés sur le régulateur à induction remis à neuf sont présentés. La machine a été testée à vide, en court-circuit, avec une charge ohmique et avec un moteur asynchrone de grande puissance. Cela permettra de vérifier son fonctionnement, de déterminer les valeurs limites de la machine et de comparer les résultats au calcul analytique et à la simulation.

10.1 Préparations aux mesures

La machine est câblée selon le schéma suivant :

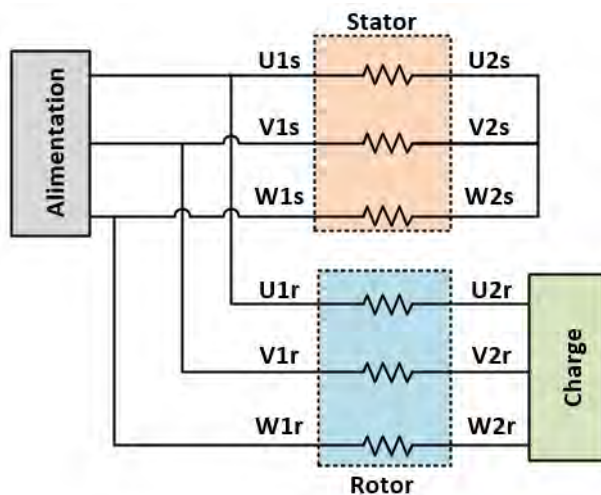


Figure 87 : Schéma de câblage du régulateur à induction remis à neuf

Les essais ont été réalisés dans les ateliers de Valélectric avec les mêmes instruments de mesure que lors des tests sur la machine initiale.

Le moteur de rotation d'angle est branché sur convertisseur de fréquence permettant un réglage de l'angle précis. A la figure suivante est présentée la table de test :

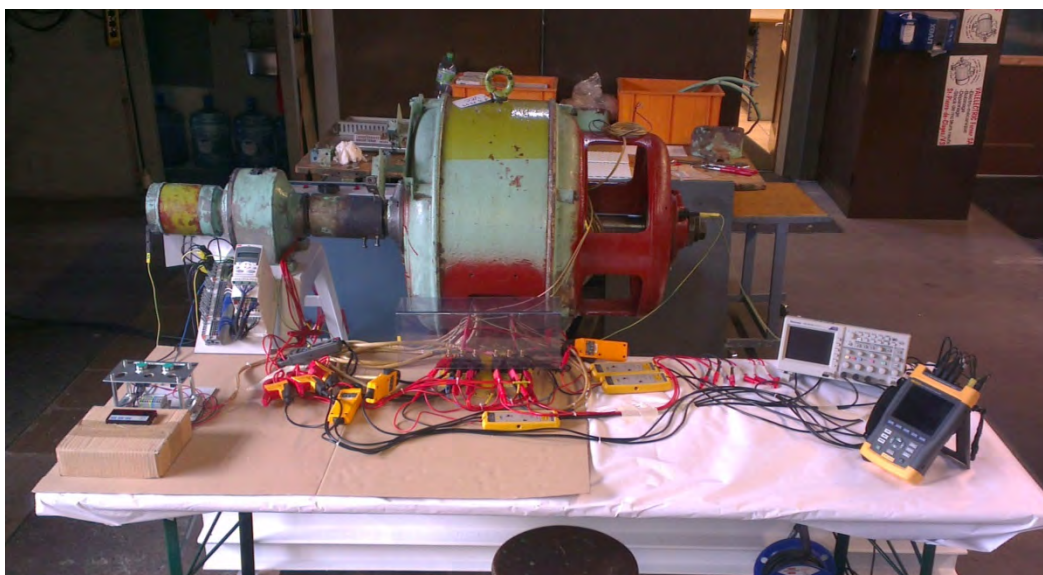


Figure 88 : Montage pour test du régulateur (ventilation forcée non-montée)

10.1.1 Mesures de continuité et d'isolation

Les résistances des enroulements au rotor et au stator sont mesurées et comparées à l'estimation faite par calcul :

	Calcul	Mesure	Erreur [%]
Résistance stator [mΩ]	94	126	25
Résistance rotor [mΩ]	136	162	16

Tableau 33 : Tableau comparatif des résistances cuivre

La résistance cuivre des enroulements a été sous-estimée. Cette différence peut venir de la longueur des têtes de bobines qui a été dépréciée et de la mise en série des têtes de bobines et des câbles de connexions qui n'ont pas été prises en compte.

Une mesure d'isolation est réalisée à l'aide du mégohmmètre. La mesure est effectuée avec une tension de 2500 [V] entre les enroulements et la masse de la machine. La résistance d'isolement au stator est de 8 [GΩ] et de 2 [GΩ] au rotor.

Une mesure par onde de choc (Backer) à 2500 [V] est aussi réalisée afin de vérifier la symétrie des enroulements et la qualité de l'isolation.

10.2 Mesures à vide

Cette section présente le résultat des mesures à vide effectuées sur le régulateur à induction. Les mesures suivantes seront réalisées : variation de la tension de sortie en fonction de l'angle, mesure de la puissance à vide et détermination de R_{fe} et de X_h .

10.2.1 Variation de l'angle du rotor à tension nominale

Le régulateur à induction est alimenté par une source de tension triphasée de 3x400 [V]. La machine est placée en position minimale, puis son angle est varié par palier de 5[°] jusqu'en position maximale.

Dans le tableau suivant, le résultat de la mesure et du calcul analytique sont comparés (les tensions présentées sont mesurées entre phase et neutre) :

Essai à vide : variation de l'angle - Ureseau = 230 [V]

Phi rotor [°]	Calcul Uload [V]	Mesure Uload [V]	Erreur [%]
0	4,5	7,2	37,8
5	40,8	38,7	5,5
10	80,9	78	3,7
15	124,0	118,2	4,9
20	159,0	158,5	0,3
25	196,4	196,8	0,2
30	232,4	235,8	1,5
35	266,5	267,5	0,4
40	298,7	299,2	0,2
45	328,5	331,8	1,0
50	355,9	357,4	0,4
55	380,6	383,7	0,8
60	402,3	405,7	0,8
65	421,0	423,8	0,7
70	436,5	437,2	0,2
75	448,7	450	0,3
80	457,5	459,5	0,4
85	462,7	465,5	0,6
90	464,0	468,7	1,0

Tension de sortie en fonction de l'angle du rotor
(Ualim = 230 [V])

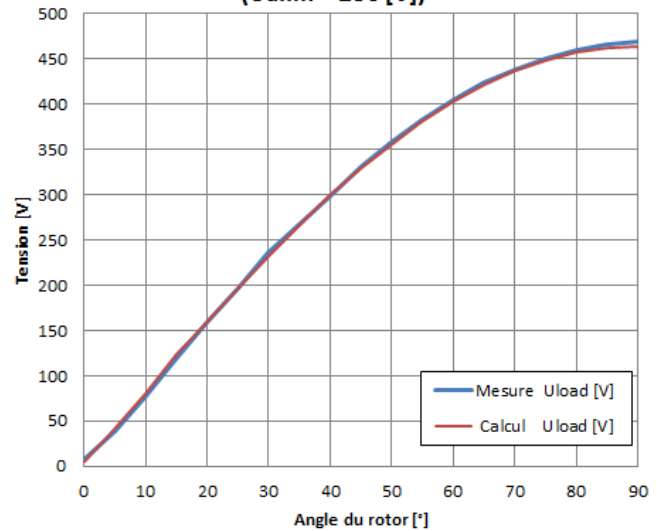


Tableau 34 : Evolution de la tension de sortie en fonction de l'angle du rotor à tension

Le régulateur à induction dans sa nouvelle configuration permet à la tension de phase de sortie de varier entre **7 et 469 [V]**. Soit une tension de ligne de sortie variable entre **12 et 812 [V]**.

En position minimale, la tension de phase de sortie est de 7 [V]. Or elle a été calculée à 4.5 [V]. Cette différence va être expliquée plus tard lors de la détermination de l'inductance de fuite du schéma équivalent. En effet, elle est bien plus petite que calculée et cela implique une plus petite chute de tension à ces bornes donc une tension induite plus grande.

Après discussion avec le mandant, une tension de ligne de 12 [V] en position minimale ne pose aucun problème pour tester des moteurs électriques. L'autotransformateur qui est utilisé actuellement pour les essais débute avec une tension de ligne de 60 [V].

10.2.2 Mesures de puissance à vide

La puissance à vide de la machine est mesurée. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants (les tensions présentées sont mesurées entre phase et neutre). Les résultats de mesures sont comparés au script de calcul analytique et à la simulation:

Essai à vide : position du rotor 90°

	Calcul	Simulation	Mesure
UL1-N [V] (réseau)	230	230	231
UL1-U [V] (induite)	234,5	233	236,4
UU-N [V] (sortie)	464,5	462	467,2
Ireseau [A]	8,37	8,83	9,89
Angle Ureseau-Uinduite[°]	180	180	180
Angle Ureseau-USortie[°]	0	0	0
Angle Uinduite-USortie[°]	180	180	180
Preseau [kW]	0,78	0,85	0,65
Qreseau [kVar]	5,72	6,03	6,9
Sreseau [kVA]	5,77	6,09	7
cos(phi)reseau	0,13	0,14	0,08

Tableau 35 : Puissance à vide du régulateur à induction en position maximale

Les valeurs de puissances mesurées sont légèrement supérieures au script de calcul analytique et à la simulation. Cette différence pourra être expliquée en déduisant X_h et R_{fe} . Dans l'ensemble les résultats correspondent bien.

10.2.3 Détermination de X_h et R_{fe} du schéma équivalent

Les mesures de puissance à vide permettent de déterminer R_{fe} et X_h . Pour rappel, le schéma équivalent du transformateur à vide est le suivant :

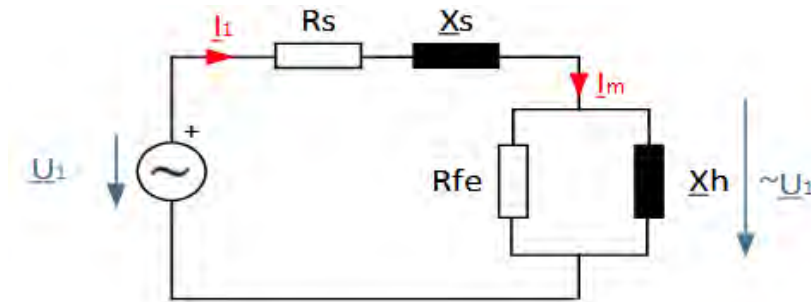


Figure 89 : Schéma équivalent à vide du régulateur à induction

Selon les tableaux précédents, les valeurs suivantes ont été mesurées :

$$I_1 = 9.89 \text{ [A]} \quad U_1 = 231 \text{ [V]} \quad P_{phase} = 216.7 \text{ [W]} \quad Q_{phase} = 2300 \text{ [Var]} \quad S_{phase} = 2333 \text{ [VA]}$$

$$R_{fe} \cong \frac{U_1^2}{(P_{phase} - R_1 \cdot I_1^2)} = \frac{231^2}{(216.7 - 0.126 \cdot 9.89^2)} = 261 \text{ [\Omega]}$$

$$X_h \cong \frac{U_1^2}{Q_{phase}} = \frac{231^2}{2300} = 23.2 \text{ [\Omega]}$$

La résistance fer a été supposée comme constante à 196 $[\Omega]$ hors ici elle est mesurée à 261 $[\Omega]$, cela représente une différence d'environ 25%. Dans la configuration d'origine, le nombre de spires d'une phase était de 84 spires pour un courant à vide de 11 $[A]$. Dans la nouvelle configuration, il y a 86 spires en série par phase pour un courant à vide de 9.89 $[A]$. Le produit de $N \cdot I$ ou Θ dans la configuration initiale valait 924 $[A]$ dans la configuration actuelle vaut 851 $[A]$. Le paquet de tôle de la machine est donc légèrement moins saturé et les pertes fer sont moins importantes.

Dans le tableau suivant, sont présentées les inductances de champ principal obtenues lors du calcul, de la simulation et de la mesure :

	Calcul	Simulation	Mesure
Inductance [mH]	85,8	81	73,8
Réactance $[\Omega]$	26,94	25,44	23,2

Tableau 36 : Comparatif des inductance de champ principal

Le résultat de la mesure de l'inductance de champ principal est très proche du calcul et de la simulation. Cela est très satisfaisant.

10.3 Mesures en court-circuit

Dans cette section, les mesures effectuées avec la sortie du régulateur à induction en court-circuit sont présentée. Les essais suivants sont réalisés : mesure de puissance en position minimale et maximale et essais d'échauffement de la machine.

10.3.1 Mesures de puissance en court-circuit

- **Position minimale**

Le premier essai est réalisé avec le rotor en position minimale avec une tension d'alimentation de phase de 230 [V]. Cet essai permet de comparer le résultat avec le calcul analytique et la simulation.

Le résultat est présenté dans le tableau suivant (les tensions présentées sont des tensions de phase) :

Essai en court-circuit : position du rotor 0°

	Calcul	Simulation	Mesure
U_{L1-N} [V]	230	230	230
I_{reseau} [A]	8,4	9,07	10
I_{rotor} [A]	2,9	2,12	5,73
I_{stator} [A]	10,9	10,67	15,67
Angle $I_{\text{reseau}}-I_{\text{stator}}$ [°]	0	6	3
Angle $I_{\text{reseau}}-I_{\text{rotor}}$ [°]	180	180	180
Angle $I_{\text{stator}}-I_{\text{rotor}}$ [°]	180	186	183
P_{reseau} [kW]	0,78	0,84	0,6
Q_{reseau} [kVar]	5,75	6,20	7
S_{reseau} [kVA]	5,8	6,26	7
$\cos(\phi)_{\text{reseau}}$	0,13	0,135	0,09

Tableau 37 : Puissance en court-circuit du régulateur à induction en position minimale

Les puissances et le courant du réseau sont semblables aux estimations. Par contre, le courant au stator et au rotor sont fortement différent. Cette différence pourra être expliquée une fois les éléments du schéma équivalent connus.

- **Position maximale**

Le régulateur à induction est placé en position maximale avec une tension d'alimentation réduite. Pour ce faire, le montage suivant est réalisé :

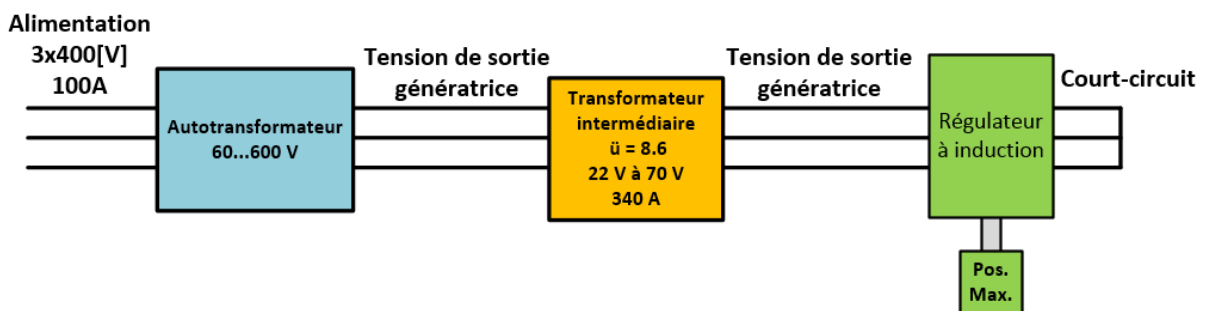


Figure 90 : Schéma de la mesure en court-circuit en position maximale

L'autotransformateur alimente avec une tension élevée un transformateur. Ce transformateur permet d'obtenir une tension de sortie entre 0 [V] et 70 [V] pour une tension d'entrée entre 60[V] et 600 [V]. Cela permet de diminuer l'intensité du courant au réseau durant la durée des tests.

A la figure suivante, est présenté le transformateur intermédiaire :



Figure 91 : Essai en court-circuit avec transformateur

Une tension d'alimentation de phase de 15 [V] est appliquée. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (les tensions présentées sont mesurées entre phase et neutre). Les résultats de mesures sont comparés au script de calcul analytique et à la simulation:

Essai en court-circuit : position du rotor 90°

	Calcul	Simulation	Mesure
U_{L1-N} [V]	15	15	15
I_{reseau} [A]	34,5	32,1	60,2
I_{rotor} [A]	16,8	15,62	29,4
I_{stator} [A]	17,7	16,5	30,8
Angle I_{reseau}-I_{stator} [°]	0	0	0
Angle I_{reseau}-I_{rotor} [°]	0	0	0
Angle I_{stator}-I_{rotor} [°]	0	0	0
P_{reseau} [kW]	0,2	0,21	0,8
Q_{reseau} [kVar]	1,54	1,43	2,6
S_{reseau} [kVA]	1,55	1,44	2,7
cos(phi)_{reseau}	0,13	0,143	0,31

Tableau 38 : Puissance en court-circuit du régulateur à induction en position maximale

L'ensemble des courants est environ deux fois plus élevé lors de la mesure que lors du calcul analytique ou de la simulation. Cette différence peut être expliquée en déterminant les inductances de fuite.

- **Détermination de $X_{\sigma S}$ et $X'_{\sigma T}$ du schéma équivalent**

A partir de ces informations, les éléments restants du schéma équivalent peuvent être trouvés. Pour rappel, le schéma du transformateur en court-circuit est le suivant :

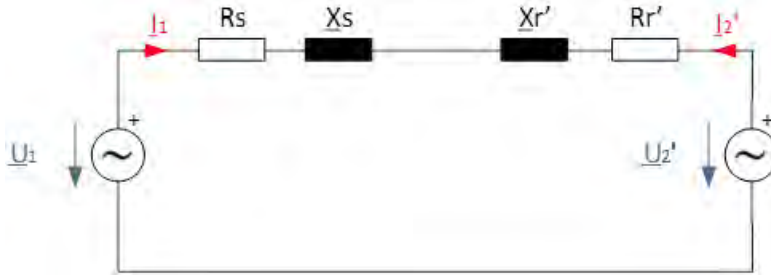


Figure 92 : Schéma équivalent du régulateur à induction en court-circuit

Les valeurs suivantes ont été mesurées :

$$\underline{\dot{u}} = 0.977 \angle 180^\circ \quad I_1 = 30.8[A] \quad I_2 = 29.4[A] \quad U_1 = 15 [V]$$

Le courant du secondaire est rapporté :

$$I_2' = \frac{I_2}{\underline{\dot{u}}} = -\frac{I_2}{\underline{\dot{u}}} = -\frac{29.4}{0.977} = -30.1[A]$$

Le courant rapporté au primaire et le courant du primaire correspondent bien. Cela implique qu'un très faible courant circule dans la branche magnétisante. Il peut être négligé.

Les tensions rapportées dans le schéma équivalent peuvent être calculées :

$$U_2' = U_1 \cdot \underline{\dot{u}} = 15 \cdot (0.977 \angle 180^\circ) = -14.66[V]$$

$$U_{comp} = U_1 - U_2' = 15 - (-14.655) = 29.66 [V]$$

L'impédance en court-circuit peut être calculée :

$$Z_{comp} = \frac{U_{comp}}{I_1} = \frac{29.66}{30.8} = 0.962 [\Omega]$$

$$X_\sigma = \sqrt{Z_{comp}^2 - (R_r' + R_s)^2} = \sqrt{0.962^2 - (0.162 \cdot 0.977^2 + 0.126)^2} = 0.921[\Omega]$$

Les impédances $\underline{X_s}$ et $\underline{X_r'}$ sont supposées identiques :

$$X_{\sigma s} \cong X_{\sigma r'} \cong \frac{X_\sigma}{2} = \frac{0.921}{2} = 0.46[\Omega]$$

• Discussion sur les inductances de fuite

Les réactances de fuites ont été calculées pour le rotor à 0.857 [Ω] et pour le stator à 0.787 [Ω]. Elles ont été déterminées grâce à la formule suivante [1] :

$$L_w = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot q \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot (2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{lew} + w_{ew} \cdot \lambda_w)$$

Les facteurs λ_{lew} et λ_w sont donnés en fonction du type de bobinage. Ils ont été considérés à 0.2 pour le premier et à 0.2 pour le second [1].

Il s'agit de facteurs empiriques dépendant du type bobinage. Pour retrouver les mêmes résultats que lors des mesures, il aurait fallu considérer les deux facteurs à 0.3.

Une inductance de fuite trop basse influence fortement les résultats de l'essai à vide et de l'essai en court-circuit. En effet, lors de l'essai à vide, la chute de tension sur $X_{\sigma s}$ est

moins importante donc la tension induite sera plus grande. Lors de l'essai en court-circuit l'impédance de court-circuit est plus petite donc le courant est plus important.

10.3.2 Mesures de thermique du régulateur à induction

Dans cette section, les essais d'échauffement thermique de la machine sont réalisés. Pour ce faire, le régulateur à induction est placé dans la même configuration que pour l'essai en court-circuit en position maximale. C'est-à-dire alimenté via l'autotransformateur et le transformateur avec une tension d'alimentation réduite.

La tension de phase d'alimentation est 40.5 [V]. Le régulateur à induction est en position maximale. Cela permet un courant au stator et au rotor avoisinant 80 [A] :

U_{L1-N} [V]	40,5
Angle rotor [°]	90
I_{reseau} [A]	161
I_{rotor} [A]	80,8
I_{stator} [A]	83,3
P_{reseau} [kW]	6,7
Q_{reseau} [kVar]	18,4
S_{reseau} [kVA]	19,6
cos(phi)_{reseau}	0,34

Tableau 39 : Caractéristiques du court-circuit pour l'essai thermique

Deux essais seront réalisés : sans ventilation forcée et avec ventilation forcée. Le courant dans les enroulements est maintenu constant et l'évolution de la température des enroulements est relevée à intervalles réguliers grâce aux sondes PT100 présentes dans les têtes de bobines.

- **Sans ventilation forcée**

La température ambiante est de 28 [°]. Le premier test est réalisé sans la ventilation forcée. Le résultat est présenté à la figure suivante :

Temps t [s]	Mesure	
	Rotor T [°]	Stator T [°]
30	39	35
76	50	40
110	60	45
135	65	50
150	70	52
175	75	56
191	80	58
216	85	60
232	90	62
262	95	67
281	100	70
302	105	72
330	110	74
340	111	75
360	115	76
380	120	78

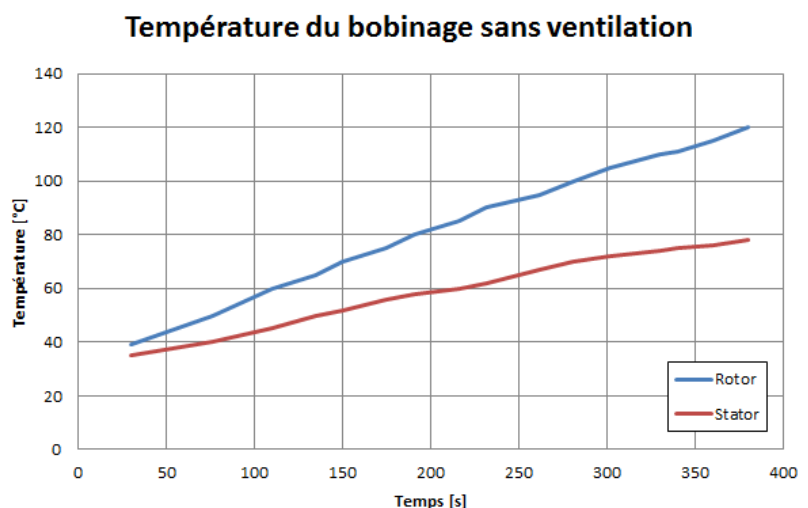


Tableau 40 : Evolution de la température des enroulements sans ventilation

L'essai est arrêté lorsque la température du rotor atteint 120[°C] par crainte pour le bobinage. L'évolution de la température au stator et au rotor est relativement linéaire.

Dans cette configuration, les pertes cuivre au rotor sont de 3'213 [W] et de 2'620 [W] au stator. La masse du cuivre au rotor est de 25 [kg] et de 35 [kg] au stator. En appliquant le calcul d'échauffement adiabatique, cela donne un temps de 382 [s] au rotor pour atteindre 120 [°C] et un temps de 409 [s] au stator pour atteindre 80 [°C].

Sans ventilation et pour un courant important, le calcul de l'échauffement adiabatique correspond très bien.

- **Avec ventilation forcée**

Le même test est réalisé mais cette fois-ci avec la ventilation forcée de la machine enclenchée.

Temps t [s]	Mesure	
	Rotor T [°]	Stator T [°]
0	27	27
40	40	35
60	46	40
83	50	43
115	56	46
135	60	48
157	65	52
180	69	55
210	74	57
225	77	59
270	82	61
300	85	63
336	90	67
360	93	70
406	95	73
432	98	74
460	100	75
524,00	105	77
577,00	106	80
600,00	108	82
660,00	110	84
720,00	112	85
780	113	85

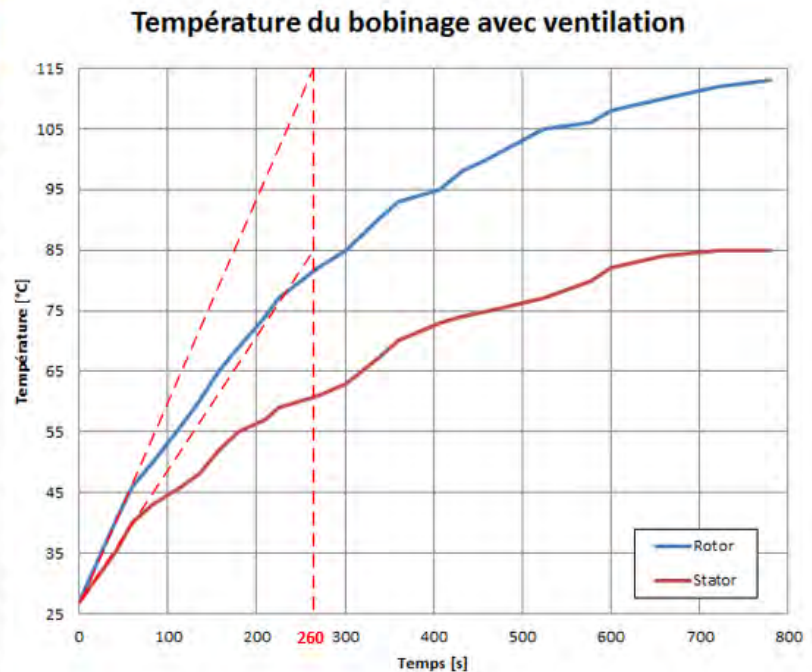


Tableau 41 : Evolution de la température des enroulements avec ventilation

L'essai a été arrêté lorsque la température du rotor a atteint 113 [°C] par crainte pour le bobinage. En effet, une erreur a été effectuée lors du bobinage du rotor. La sonde de température PT100 a été montée du côté ventilation. La sonde de température PT100 au stator est montée du côté opposé à la ventilation, ce qui est correct.

Avec la ventilation forcée et pour ces courants, la température tend vers 115° pour le bobinage rotorique et vers 85° pour le bobinage statorique. Sur la base de la figure précédente, il est possible de déterminer la constante de temps thermique du système. Elle vaut environ 260 [s], soit 4 minutes et 20 secondes.

La différence de température entre le stator et le rotor s'explique par, des pertes cuivre plus petites au stator, une masse de cuivre plus importante au stator et une meilleure ventilation sur l'extérieur de la machine (stator).

- **Image thermique**

Des images à la caméra thermique ont été réalisées durant cet essai. Les images des enroulements de la machine sont présentées à la figure suivante :

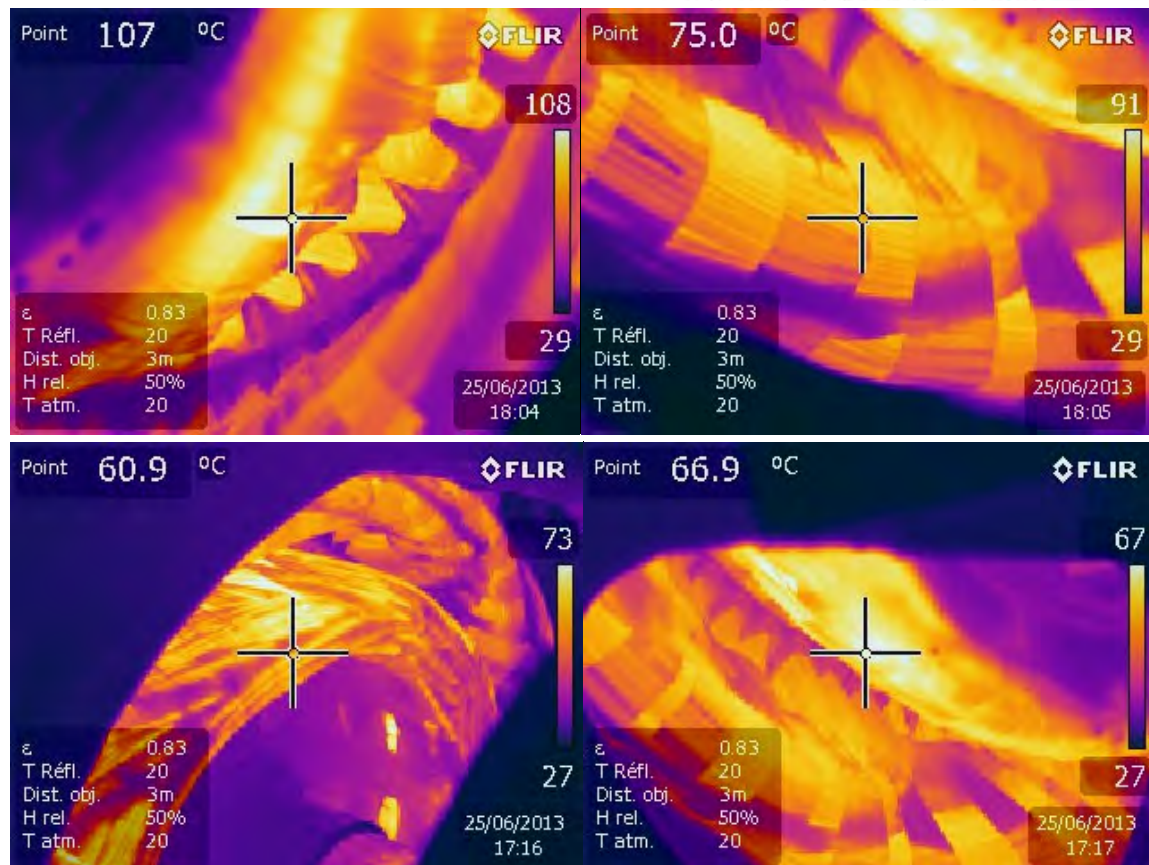


Figure 93 : Image thermiques des enroulements lors de l'essai en court-circuit

A la figure suivante est présentée l'image des plaques à bornes et des fusibles HPC 100 [A] de l'autotransformateur :

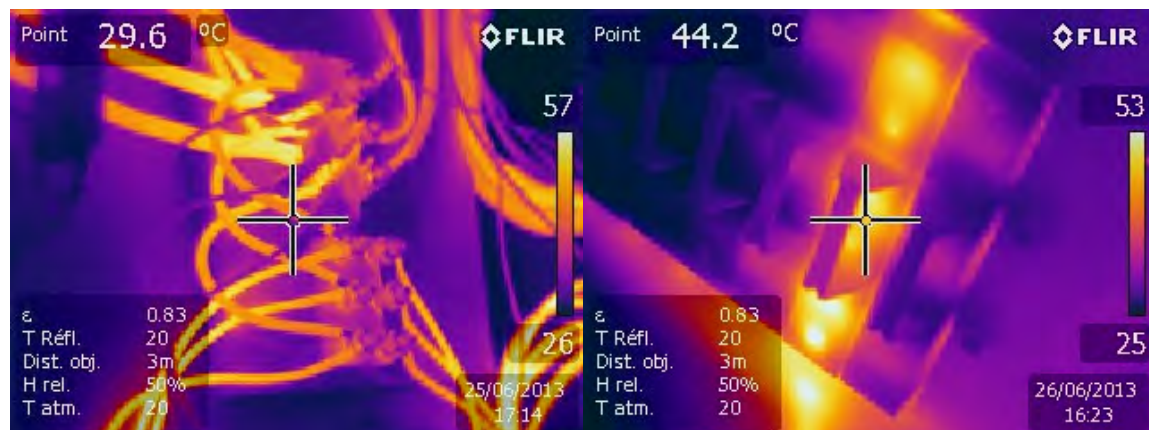


Figure 94 : Images thermique de la plaque à bornes et des fusibles lors de l'essai en court-circuit

10.4 Mesures avec charge ohmique

Le régulateur à induction est chargé à l'aide du chauffage de 5 [kW]. La tension nominale de ce dernier est de 220 [V]. Le régulateur à induction est alimenté avec une tension de phase de 230 [V].

Dans le tableau suivant, les résultats de la mesure sont présentés. Ils sont comparés aux résultats du calcul analytique et de la simulation :

Essai charge ohmique 28,8[Ohm] : position du rotor 28,5°

	Calcul	Simulation	Mesure
U_{L1-N} [V] (réseau)	230	230	230
U_{L1-U} [V] (induite)	221,5	218,3	225,5
U_{U-N} [V] (sortie)	219,5	217,4	219,9
I_{réseau} [A]	12,16	12,6	13
I_{rotor} [A]	7,62	7,64	7,37
I_{stator} [A]	15,93	16,34	17,16
Angle U_{réseau}-U_{induite} [°]	58,5	58,14	56,8
Angle U_{réseau}-U_{sortie} [°]	58,5	58,76	62
Angle U_{induite}-U_{sortie} [°]	117	116,9	120,96
Angle I_{réseau}-I_{stator} [°]	28,1	25,5	23
Angle I_{réseau}-I_{rotor} [°]	104,05	105	109,8
Angle I_{stator}-I_{rotor} [°]	132,15	130,5	132,8
Réseau	P [kW]	5,84	5,91
	Q [kVar]	6,03	6,37
	S [kVA]	8,4	8,7
	cos(phi)	0,7	0,68
Stator	P [kW]	3,13	2,71
	Q [kVar]	10,54	10,95
	S [kVA]	11	11,3
	cos(phi)	0,28	0,24
Rotor côté réseau	P [kW]	3,13	2,85
	Q [kVar]	-4,51	-4,44
	S [kVA]	5,26	5,27
	cos(phi)	0,52	0,54
Rotor côté charge	P [kW]	5,02	4,98
	Q [kVar]	0	0
	S [kVA]	5,02	4,98
	cos(phi)	1	1

Tableau 42 : Tableau de la mesure ohmique du régulateur à induction après sa remise à neuf

L'ensemble des résultats entre la mesure, la simulation et le calcul analytique correspondent bien. Le rendement de la machine dans cette configuration est de 88%. Lors d'un essai avec une charge, l'influence des éléments du schéma équivalent est atténuée. C'est pourquoi les résultats sont relativement proches.

Il y a un point qui ressort. Il s'agit de la puissance réactive capacitive qui règne au rotor du côté réseau. Pour expliquer ce phénomène, la figure suivante montre la situation de la tension sur la charge, de la tension du réseau et du courant au rotor :

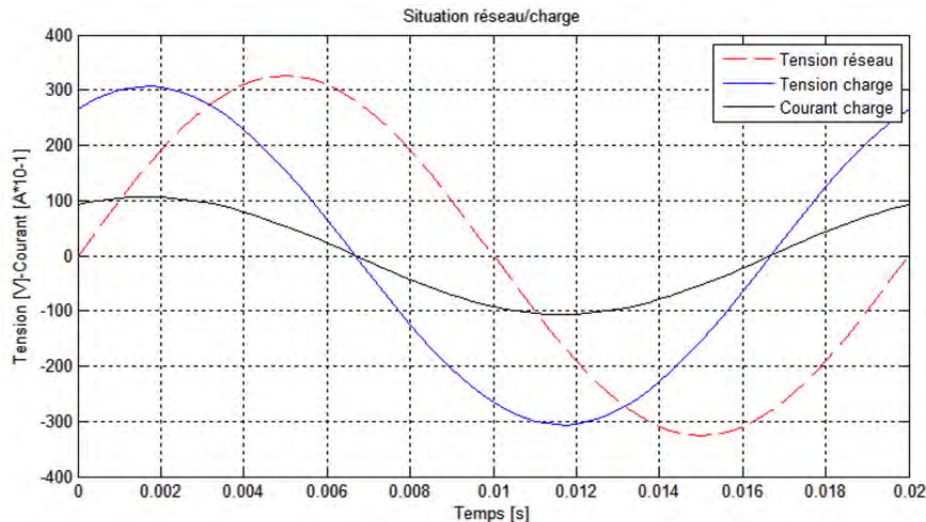


Figure 95 : Situation de la tension sur la charge, de la tension du réseau et du courant au rotor lors de l'essai avec charge ohmique

Le courant et la tension aux bornes de la charge ohmique sont en phase. La tension de sortie du régulateur à induction est en avance par rapport à la tension du réseau. Par conséquent, le courant au rotor est en avance par rapport à la tension du réseau. Cela implique une puissance réactive capacitive au rotor du côté de l'alimentation.

La puissance réactive inductive au stator est de 11.3 [kVar]. La puissance réactive capacitive au rotor est de 4.5 [kVar]. Par conséquent, la puissance réactive au réseau est de 6.9 [kVar] inductive. Cela représente un $\cos(\varphi)$ inductif de 0.63 au réseau.

10.5 Mesures d'un moteur asynchrone de 90 [kW]

Une mesure sur un moteur asynchrone Siemens de 90 [kW] tournant à vide est effectuée. Il s'agit d'une machine de remontée mécanique disponible en réserve dans les ateliers de Valélectrique. A la figure suivante est présentée une photo de la machine ainsi que sa plaque signalétique :

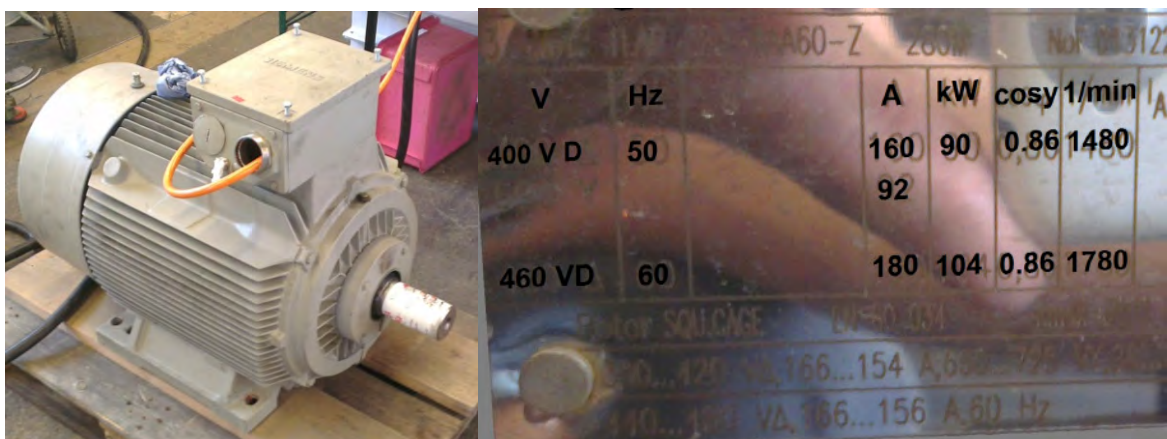


Figure 96 : Image du moteur asynchrone testé sur le régulateur à induction

Afin de tester cette machine, le régulateur à induction est branché à l'autotransformateur. Etant donné qu'il n'est pas possible d'obtenir un courant supérieur à 100 [A] coté réseau, l'entrée du régulateur à induction est branchée à une tension de phase réduite de 180 [V].

Les essais sont réalisés pour la tension nominale du moteur asynchrone, soit 400 [V] entre phases de sortie du régulateur à induction. L'essai de cette machine est aussi effectué à l'aide du modèle analytique avec les composants du schéma équivalent obtenus grâce aux mesures à vide et en court-circuit de la machine actuelle. Les résultats de la mesure et du calcul analytique sont présentés à la figure suivante :

Essai moteur asynchrone à vide : position du rotor - 52,5°

		Mesure	Calcul
	U_{L1-N} [V] (réseau)	180	180
	U_{L1-U} [V] (induite)	150,6	150,24
	U_{U-N} [V] (sortie)	230	233,12
	I_{réseau} [A]	91,7	92,05
	I_{rotor} [A]	52,3	53
	I_{stator} [A]	60,4	59,55
	Angle U_{réseau}-U_{induite} [°]	94	90
	Angle U_{réseau}-U_{sortie} [°]	44	46
	Angle U_{induite}-U_{sortie} [°]	138	136
	Angle I_{réseau}-I_{stator} [°]	42	40
	Angle I_{réseau}-I_{rotor} [°]	47,4	45
	Angle I_{stator}-I_{rotor} [°]	90	85
Réseau	P [kW]	5,5	5,20
	Q [kVar]	49,9	49,34
	S [kVA]	49,9	50,0
	cos(phi)	0,11	0,11
Stator	P [kW]	-14,3	-14,52
	Q [kVar]	29,4	28,70
	S [kVA]	32,8	32,2
	cos(phi)	-0,44	-0,45
Rotor côté réseau	P [kW]	20	19,72
	Q [kVar]	20,3	20,74
	S [kVA]	28,5	28,62
	cos(phi)	0,7	0,69
Rotor côté charge	P [kW]	2,2	2,21
	Q [kVar]	36	37,01
	S [kVA]	36	37,07
	cos(phi)	0,06	0,06

Tableau 43 : Tableau des résultats de la mesure sur un moteur asynchrone à vide

L'ensemble des mesures et du calcul analytique avec les vrais composants correspondent parfaitement. Cela permettra l'utilisation du modèle analytique dans l'avenir.

La puissance, respectivement le courant au stator, est plus important qu'au rotor. Le cosinus phi au réseau est très faible, 0.11.

Le point surprenant est la puissance active négative présente au stator. Pour expliquer ce phénomène, le flux de puissance active est représenté à la figure suivante :

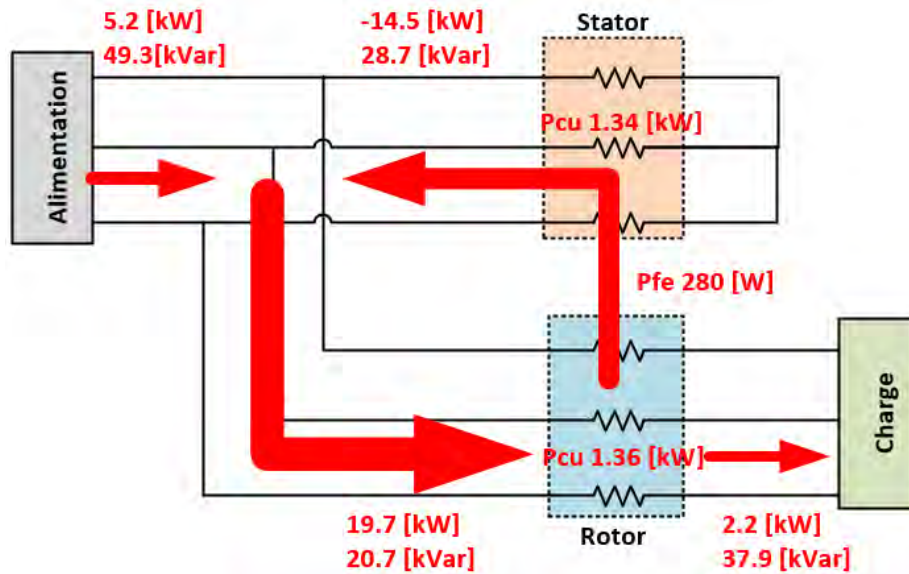


Figure 97 : Flux de puissance active dans le régulateur à induction

Une puissance active circule entre le stator et le rotor.

L'angle entre la tension de sortie et le courant du rotor est imposé par la charge. L'angle entre la tension de sortie et la tension d'alimentation est fixé par la position du rotor. Cela impose donc l'angle du courant au rotor par rapport à la tension d'alimentation. La situation est représentée à la figure suivante :

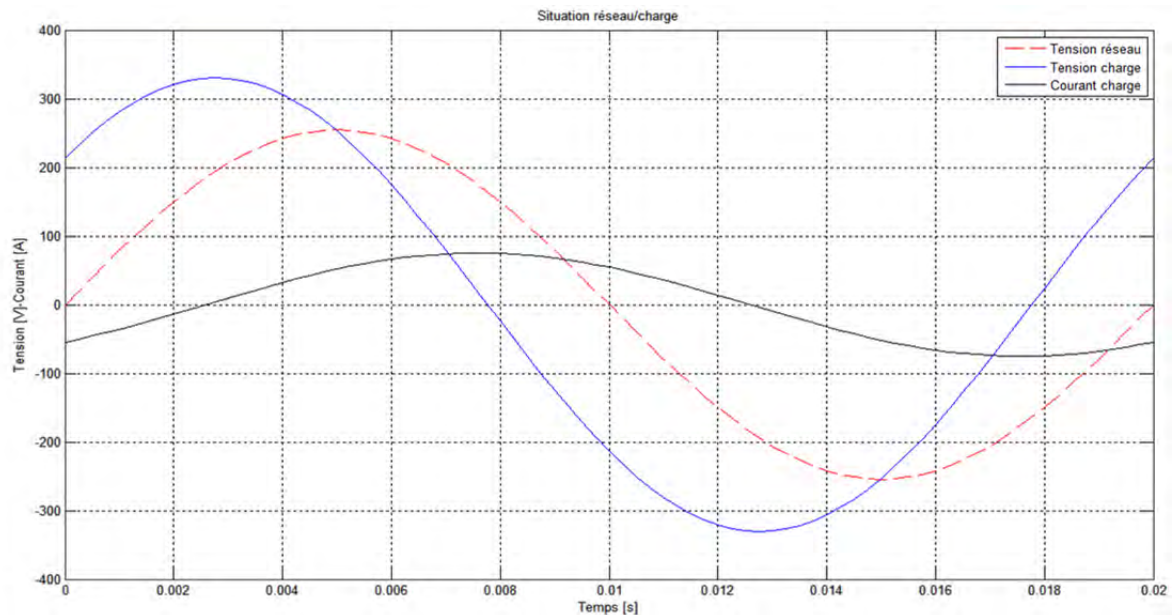


Figure 98 : Situation de la tension sur la charge, de la tension du réseau et du courant au rotor lors de l'essai avec charge inductive

Cette situation fixe la puissance au rotor du côté de l'alimentation. La puissance active à ce point ne pouvant pas passer dans la charge passe au stator de la machine créant ainsi une circulation dans la machine.

La puissance active présente à l'alimentation est la somme des pertes de la machine et la puissance active consommée dans la charge :

$$P_{\text{reseau}} = P_{\text{cu}_r} + P_{\text{cu}_s} + P_{\text{fer}} + P_{\text{charge}} = 1360 + 1340 + 290 + 2200 = 5.16 \text{ [kW]}$$

Le reste de la puissance est dissipée dans le régulateur à induction.

10.6 Courbe

Durant ces essais, les différents courants et tensions de la machine ont été mesurés à l'oscilloscope. Afin de présenter les résultats, un comparatif est effectué avec les courbes du calcul analytique et de la simulation. Il est présenté à l'Annexe 10.

Dans cette annexe, les courbes des courants et des tensions dans le régulateur à induction est présenté pour les essais suivants : à vide, en court-circuit, avec charge ohmique et avec charge inductive.

10.7 Limite d'utilisation de la machine

Les essais thermiques de la machine ont permis de déterminer le courant permanent maximum admissible au rotor, soit **80 [A]** pour un bobinage rotorique à **120 [°C]**. Grâce à cette information et au modèle analytique de la machine, les limites de la machine peuvent être déterminées.

La limite d'utilisation du régulateur à induction est fixée pour une charge inductive sous une tension de ligne en sortie et en entrée de 400 [V] (essai d'une machine à tension nominale). Dans cette configuration, le courant au rotor est de 80 [A], celui au stator de 88 [A] et le courant au réseau de 110 [A]. La puissance au réseau est de **76 [kVA]** et la puissance dans la charge de **55 [kVA]**. Si un essai dure moins de 400 [s] et qu'un système de surveillance de température est mis en œuvre, le courant peut être augmenté.

Cela permet de mettre en avant le défaut du régulateur à induction. Pour une puissance en sortie de 55 [kVA] sous une tension de 3x400V, la puissance du réseau est de 76 [kVA] pour une tension d'alimentation de 3x400V. Cela est très bien visible lors des essais sur le moteur asynchrone. Par contre, par rapport à un autotransformateur variable, le régulateur à induction présente l'avantage ne pas avoir de charbon et de ne pas être plongé dans l'huile.

- **Remarque : échange Stator/Rotor**

Il serait aussi possible d'inverser la machine. C'est-à-dire d'effectuer le point étoile au rotor et de brancher la charge directement au stator (en adaptant le nombre de spires).

Dans le cas présent, le choix d'effectuer l'étoile au stator est le bon. En effet, lors des essais un courant plus important circule au stator. Le stator étant mieux ventilé la chaleur peut être évacuée plus abondamment.

11 REDRESSEUR POUR MACHINE A COURANT CONTINU

L'entreprise révisé les machines à courant continu et ne dispose pas de source à courant continu variable suffisamment puissante afin de les tester de manière efficace. Le but de ce chapitre est d'étudier une solution simple et économique pouvant être branchée au régulateur à induction afin d'obtenir une source de tension continue variable.

11.1 Cahier des charges

Le régulateur à induction dans sa nouvelle version permet d'obtenir une tension triphasée variable de $3 \times 0 \dots 800[V_{AC}]$. La machine peut fournir un courant avoisinant la centaine d'ampères. Le redresseur à adjoindre à la machine doit idéalement pouvoir supporter ces caractéristiques.

L'alimentation d'une machine à courant continu ne dépasse généralement pas $500[V_{DC}]$. Un moteur à courant continu fonctionne très bien avec une tension redressée et non lissée.

11.2 Première approche

Le régulateur à induction permet d'obtenir une tension de phase maximale de $460[V_{rms}]$, respectivement une tension de ligne de $800[V_{rms}]$ maximale. Les valeurs crêtes en position maximale sont les suivantes :

$$\hat{U}_{U-N} = U_{U-N} \cdot \sqrt{2} = 460 \cdot \sqrt{2} = 650[V]$$

$$\hat{U}_{U-V} = U_{U-V} \cdot \sqrt{2} = 800 \cdot \sqrt{2} = 1131[V]$$

La situation des tensions d'un redresseur est illustrée à la figure suivante :

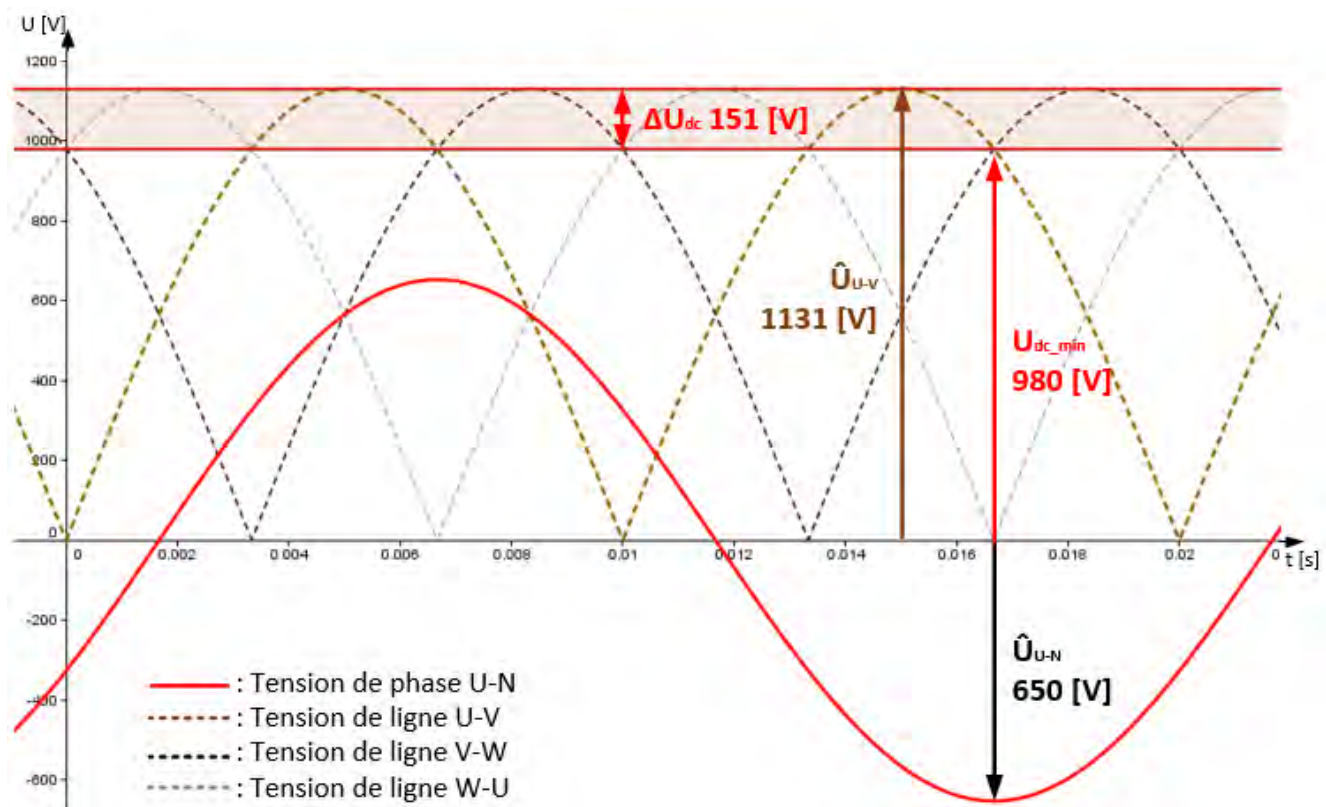


Figure 99 : Situation des tensions du redresseur

En position maximale, la valeur moyenne de la tension continue ainsi que son ondulation valent :

$$U_{DC} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{U-N} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot 460 = 1076[V]$$

$$U_{dc_min} = 980[V] \quad U_{dc_max} = 1131[V] \quad \Delta U_{DC} = 151[V] \quad (\text{voir figure précédente})$$

La figure suivante illustre le redresseur adjoint au régulateur à induction :

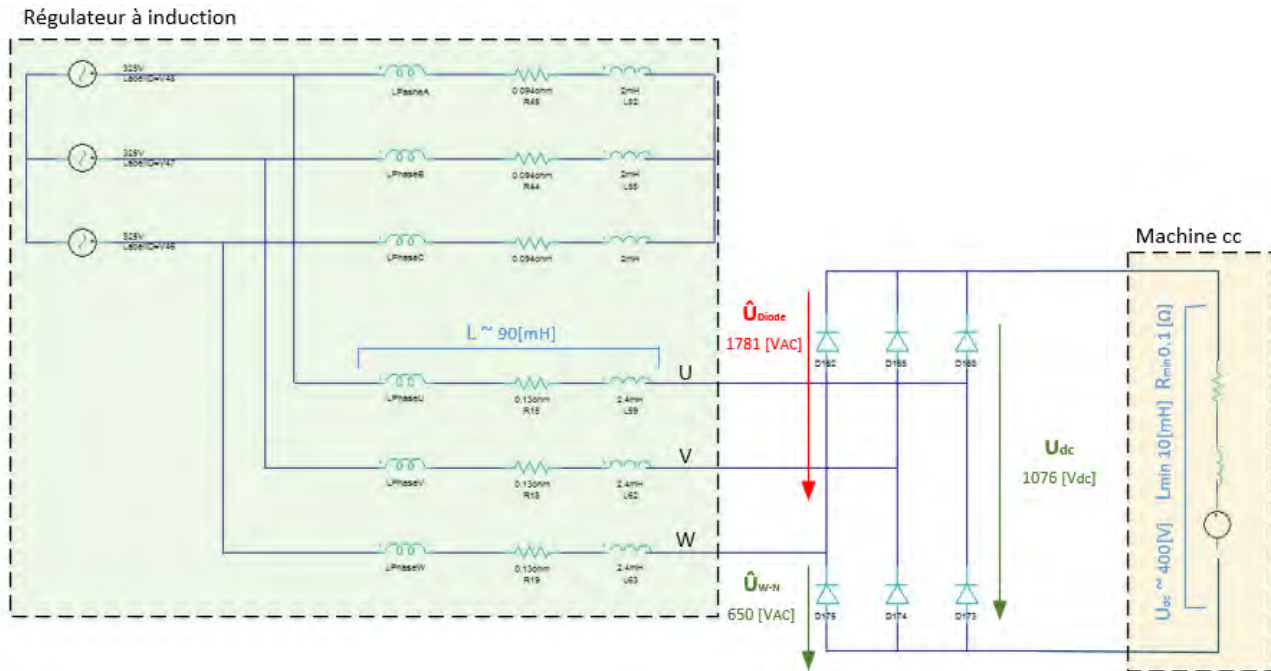


Figure 100 : Schéma de principe du redresseur

La diode étant connectée entre la tension continue et la tension de sortie de phase du régulateur à induction doit pouvoir supporter tous les écarts entre ces deux tensions.

Afin de déterminer la tension inverse maximale sur la diode avec une petite marge, il faut prendre la tension de phase à sa valeur minimale et la tension de sortie continue à sa valeur maximale, soit :

$$\hat{U}_{diode} = U_{dc_max} + \hat{U}_{U-N} = 1131 + 650 = 1781[V]$$

La description effectuée ci-dessus est bien visible à la Figure 99.

11.3 Aide à la commutation (Snubber)

L'adjonction d'un redresseur triphasé pouvant supporter 1800 [V] au système suffirait en l'absence des inductances du régulateur à induction et de la machine à tester. En effet, le blocage de la diode crée de brusques sauts de courant $\left(\frac{di}{dt}\right)$ impliquant une surtension sur les inductances :

$$U_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Cette surtension transitoire vient s'ajouter à la tension statique de la diode et peut entraîner sa destruction. Ce problème survient couramment en électronique de puissance et les

diodes doivent être protégées avec un système d'aide à la commutation (en anglais Snubber).

11.3.1 Descriptif du problème

Dans les différentes parties de la caractéristique statique d'une diode, il y a une densité de porteurs de charge différente. Les porteurs de charge ne peuvent se déplacer qu'avec une vitesse limitée : c'est pourquoi il y a des effets transitoires lors du changement de l'état bloqué à l'état de conduction et vice versa. [3]

Les points suivants sont essentiels pour la caractéristique du composant :

- ♦ Effet d'accumulation des porteurs de charge : un élément redresseur ne peut pas bloquer instantanément le courant lors d'un changement rapide du courant. Le courant devient négatif pendant un bref instant (temps de stockage t_s) et tombe ensuite rapidement à zéro. Ce temps de stockage est nécessaire pour éliminer les porteurs de charge. Une fois les porteurs de charge éliminés, l'élément se trouve dans l'état bloqué. [3]
- ♦ Si le système comporte une inductance : la variation rapide du courant après le temps de stockage induit une surtension qui s'ajoute à la tension statique de l'élément. La capacité C_j de la diode et l'inductance forment un circuit oscillant qui provoque le blocage représenté dans la figure suivante. [3]

Cette surtension peut entraîner la destruction de la diode. Elle peut être diminuée à l'aide d'un circuit RC en parallèle avec l'élément redresseur agissant en tant que filtre.

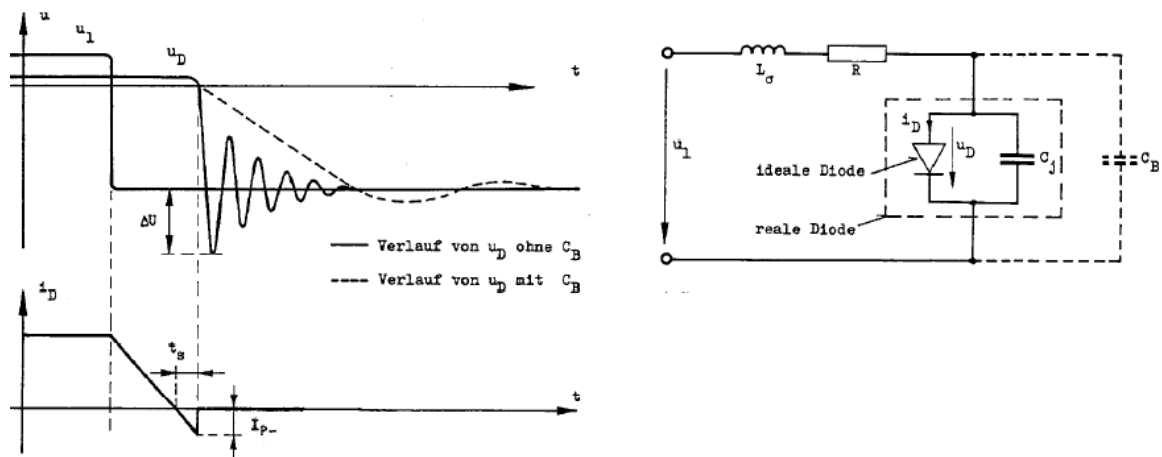


Figure 101 : Concept de l'aide à la commutation [3]

11.3.2 Dimensionnement du système

En parallèle à la diode, un circuit RC est branché afin de la protéger des surtensions :

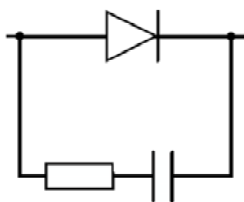


Figure 102 : Circuit d'aide à la commutation de la diode

L'inductance du régulateur à induction étant de 85 [mH] et l'inductance d'une machine à courant continu étant généralement supérieure à 10 [mH], une inductance de **100 [mH]** est prise en compte pour le dimensionnement du système.

Pour de grosses inductances, il faut utiliser des capacités dans la gamme du microfarad. En effectuant une première recherche rapide de composant, pour des tensions avoisinant 2000 [V], des capacités de puissance de **2.2 [uF]** sont disponibles. Cela peut correspondre.

Le circuit d'aide à la commutation peut être vu comme un filtre RLC permettant d'absorber la surtension transitoire :

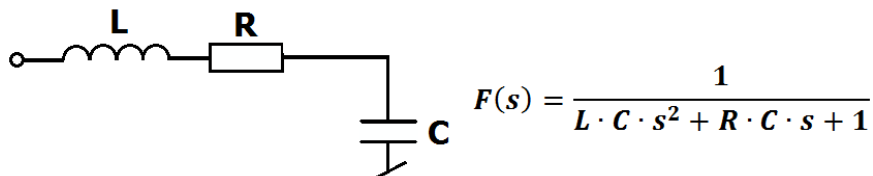


Figure 103 : Filtre RLC et sa fonction de transfert

Afin d'obtenir une réponse rapide mais pas trop oscillante et un facteur de qualité proche de 1. La résistance doit être choisie selon [3] :

$$R \approx \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0.1}{2.2 \cdot 10^{-6}}} = 213.2 [\Omega]$$

Une première recherche rapide de composant permet de trouver une résistance de puissance de **240 [Ω]**.

Le comportement pour différentes inductances est simulé à l'aide de Matlab. Un brusque saut est appliqué au circuit RLC afin de constater son comportement dynamique :

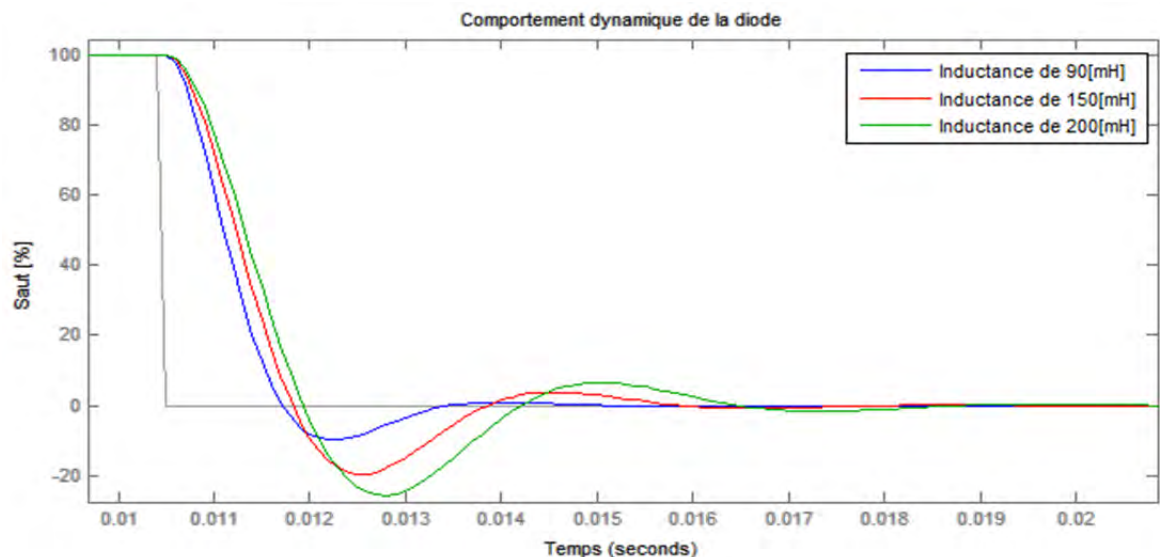


Figure 104 : Simulation dynamique du circuit d'aide à la commutation

Le comportement dynamique du circuit d'aide à la commutation correspond aux attentes. Son comportement est rapide avec deux oscillations.

Le digramme de Bode du circuit d'aide à la commutation pour différentes inductances est représenté à la figure suivante :

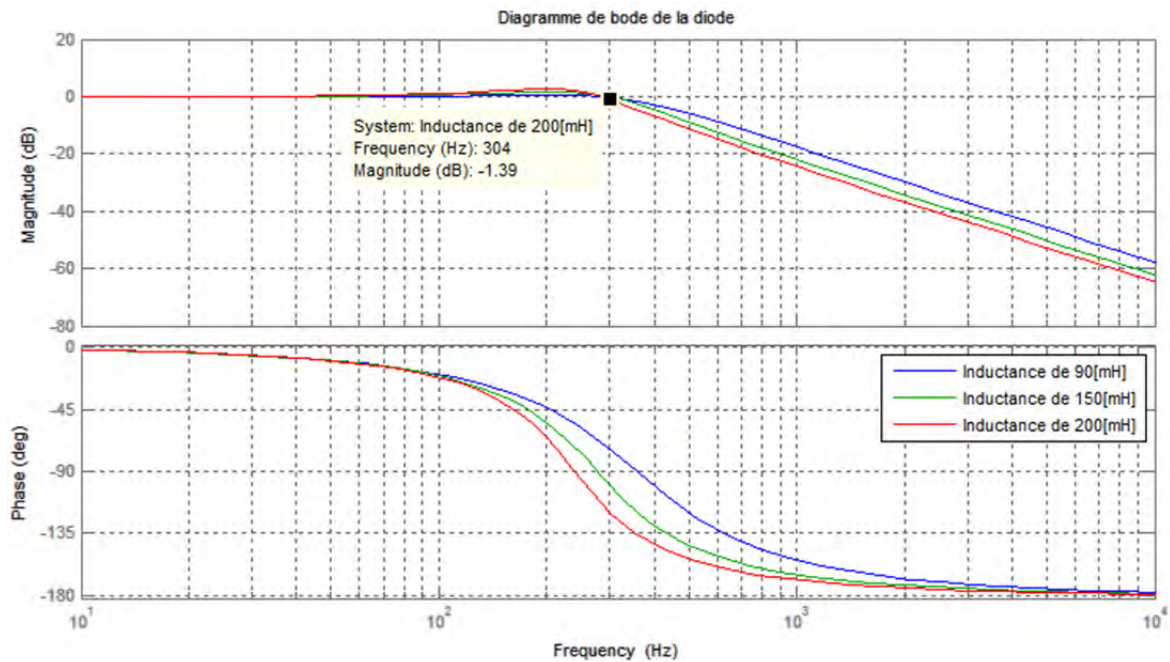


Figure 105 : Diagramme de Bode du circuit d'aide à la commutation pour différentes inductances

La fréquence de coupure du circuit d'aide à la commutation se situe vers 300 [Hz]. Une légère résonance est présente avant l'atténuation.

11.4 Dimensionnement du redresseur

En ne prenant pas en compte les effets transitoires, les diodes doivent pouvoir supporter une tension maximale de 1800 [V] afin de pouvoir exploiter la totalité de la gamme de tension du régulateur à induction. Avec le circuit d'aide à la commutation, les sauts de tensions transitoires sont diminués mais demeurent encore. C'est pourquoi il a été choisi de prendre pour le circuit du redresseur des composants pouvant supporter une tension maximale de 2400 [V]. Cela permet de garder une marge raisonnable tout en restant dans une gamme de produits accessible.

11.4.1 Composants

- **Diodes**

La première idée a été de choisir un module redresseur triphasé avec les six diodes intégrées. Hélas, de tels modules supportant des tensions inverses de 2400 [V] sont chers et ne sont pas disponibles tout de suite. Il en va de même pour des diodes individuelles supportant de telles tensions.

Le choix final s'est porté sur la mise en série de deux diodes supportant chacune 1200[V]. Cela permet une solution économique et immédiatement disponible.

Dans les diodes de cette gamme, il en existe pour des courants de : 50[A], 70[A], 85[A], 100[A], 110[A], 130[A] et 230 [A]. La différence de prix pour les modèles pouvant supporter une centaine d'ampères n'est que de quelques francs. C'est pourquoi il a été opté pour la diode permettant un courant direct de 130 [A].

Les caractéristiques de la diode sont les suivantes :

- ♦ tension inverse de pointe : 1200[V] ;

- ♦ tension directe : < 1.5 [V] ;
- ♦ courant direct : 130[A] ;
- ♦ courant inverse : 22 [mA] ;
- ♦ fabricant et n° de produit : Semikron SKN130/12 ;
- ♦ prix unitaire : 38.23 CHF. ;
- ♦ quantité nécessaire : 12.

- **Capacité**

La gamme de capacité pouvant supporter une tension de 2400 [V] à prix abordable et disponible de suite est restreinte.

Le choix final s'est fait pour une capacité dont les caractéristiques sont les suivantes :

- ♦ capacité : 2.2 [uF] ;
- ♦ tension inverse de pointe : 240[V] ;
- ♦ courant nominal maximum: 10[A] ;
- ♦ courant crête maximum : 220 [A] ;
- ♦ courant de choc maximum : 550 [A] ;
- ♦ fabricant et n° de produit : EPCOS B25835-M225-K7 ;
- ♦ prix unitaire : 101.41 CHF ;
- ♦ quantité nécessaire : 6.

- **Résistance**

Deux résistances supportant 1200 [V] sont mises en série.

Les caractéristiques de la résistance sont les suivantes :

- ♦ résistance : 120[Ω] ;
- ♦ rigidité diélectrique : 1250 [V] ;
- ♦ puissance nominale : 130[A] ;
- ♦ fabricant et n° de produit : Arcol HS50 120R F ;
- ♦ prix unitaire : 3.67 CHF. ;
- ♦ quantité nécessaire : 12.

La fiche technique de tous les composants est disponible à l'Annexe 11 .

11.4.2 Schéma

Le schéma électrique du redresseur avec le circuit d'aide à la commutation se trouve à la figure suivante :

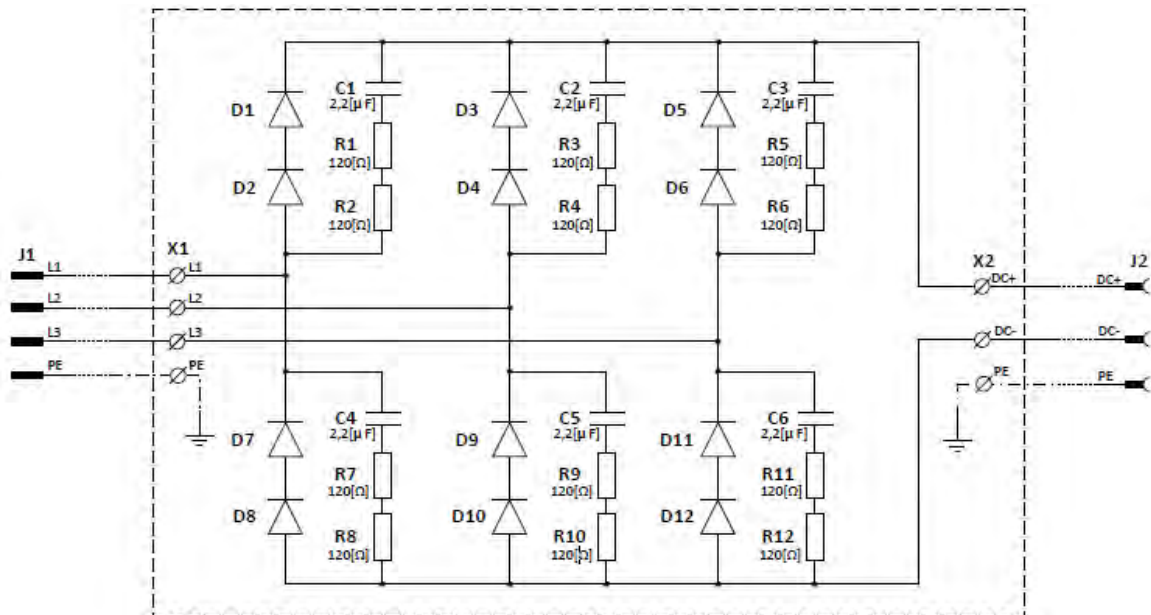


Figure 106 : Schéma du redresseur avec circuit d'aide à la commutation

Le schéma électrique est disponible en format plus grand à l'Annexe 12 .

11.4.3 Echauffement des semi-conducteurs

La puissance dissipée dans les diodes se calcule de la manière suivante :

$$P_{diode} = U_{FS} \cdot I_{AVG} + R_{DIFF} \cdot I_{RMS}^2 = U_{FS} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) \cdot dt + R_{DIFF} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) \cdot dt$$

Pour calculer de manière simple les pertes des diodes, le courant de sortie est défini comme parfaitement continu. Chaque branche de diode conduit $\frac{1}{6}$ de la période un courant continu :

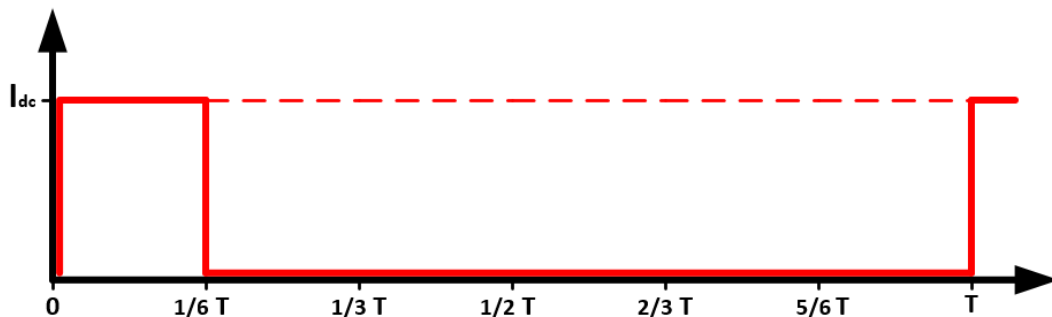


Figure 107 : Temps de conduction d'une diode du redresseur

Avec cette considération, les pertes d'une diode se calcule de la manière suivante :

$$P_{diode} = U_{FS} \cdot I_{DC} \cdot \frac{T_{ON}}{T} + R_{diff} \cdot I_{DC} \cdot \sqrt{\frac{T_{ON}}{T}}$$

En prenant en compte les données techniques des diodes, les pertes du redresseur valent :

$$P_{diodes} = 12 \cdot \left(0.85 \cdot 130 \cdot \frac{1}{6} + 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 130 \cdot \sqrt{\frac{1}{6}} \right) = 220 [W]$$

La ventilation de l'armoire doit pouvoir évacuer cette puissance. Le débit d'air de la ventilation est calculé à l'aide du programme de dimensionnement STEGO® :

1. Différence de température <small>Les variations de température (par ex. jour/nuit, été/hiver, zones climatiques) doivent être prises en compte. Veuillez indiquer dans les champs ci-dessous la différence de température maximale ou déterminez la différence de température dans l'armoire à l'aide de la température intérieure max. souhaitée (Ti) et de la température ambiante prévue (Tu) :</small>	
Température ambiante maximale	<input style="width: 90%;" type="text" value="30"/> °C
Température intérieure souhaitée	<input style="width: 90%;" type="text" value="70"/> °C
Différence de température	<input style="width: 90%;" type="text" value="40"/> K
2. Puissance dissipée <small>Les composants installés à l'intérieur des armoires ou boîtiers (par ex. transformateurs, relais, semi-conducteurs, barres d'alimentation) génèrent de la chaleur lors du fonctionnement. Cet échauffement est appelé « puissance dissipée ».</small>	
Puissance dissipée	<input style="width: 90%;" type="text" value="300"/> W
3. Constante d'air <small>L'altitude du site d'utilisation détermine la constante d'air (f). Celle-ci permet de tenir compte des baisses de pression d'air et de densité atmosphérique qui surviennent en haute altitude.</small>	
Altitude en mètres	<input style="width: 90%;" type="text" value="750 à 1000"/>
Constante d'air	<input style="width: 90%;" type="text" value="3,5"/> m³K/Wh
4. Calcul	
Débit d'air nécessaire	<input style="width: 90%;" type="text" value="26.25"/> m³/h

Figure 108 : Script de dimensionnement de ventilation STEGO

Une marge sur la puissance dissipée est prise. Le débit d'air de la ventilation doit être de 26 [m³/h].

Un ventilateur avec une hélice de ø120 [mm] permettant un débit d'air de 40 [m³/h] permettra l'évacuation de la chaleur dans le tableau.

11.5 Simulation Maxwell

Afin de simuler le comportement du régulateur à induction avec le redresseur, une simulation sous Maxwell est effectuée.

11.5.1 Schéma de simulation

Le circuit du redresseur avec le circuit d'aide à la commutation est implémenté à la suite du régulateur à induction. Le schéma est le suivant :

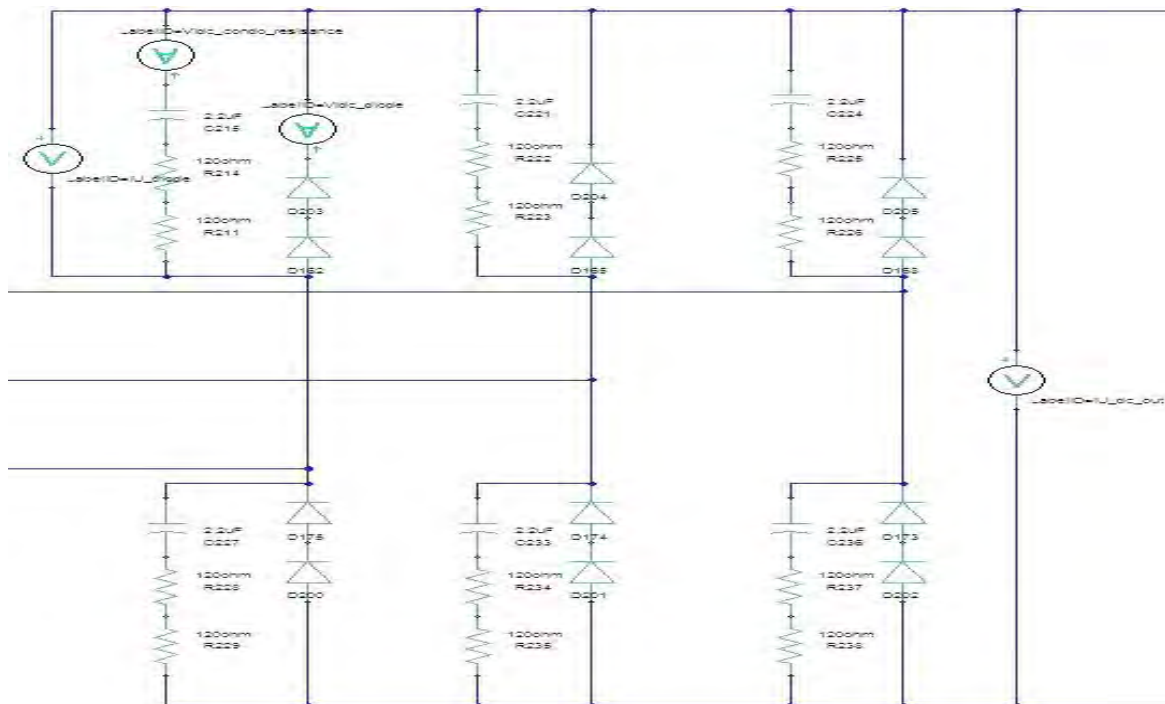


Figure 109 : Schéma de simulation Maxwell du redresseur et du circuit d'aide à la commutation

Afin de reproduire la situation réelle, deux résistances et deux diodes sont branchées en série.

11.5.2 Simulation à vide

Une première simulation est effectuée sans charge et en faisant varier l'angle du rotor de 0° à 180° pour une tension de phase coté réseau de 230 [V_{rms}]. Le résultat est affiché à la figure suivante :

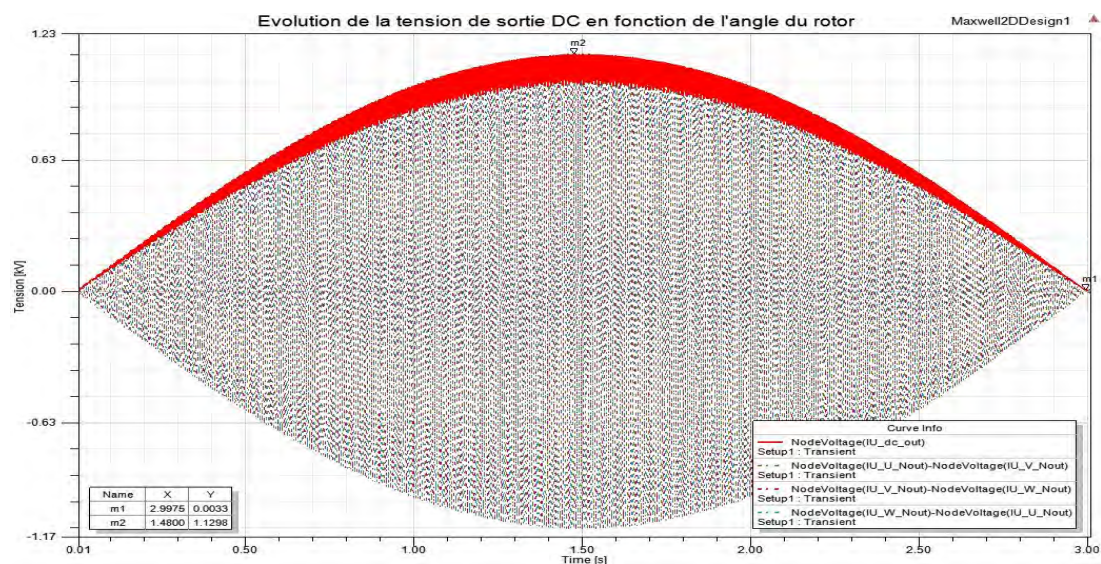


Figure 110 : Évolution de la tension de sortie du régulateur à induction avec redresseur

En rouge, il s'agit de la tension redressée, les autres courbes sont les tensions de ligne de sortie du régulateur à induction.

Un zoom sur la position maximale et minimale est effectué afin de mieux se rendre compte de la situation :

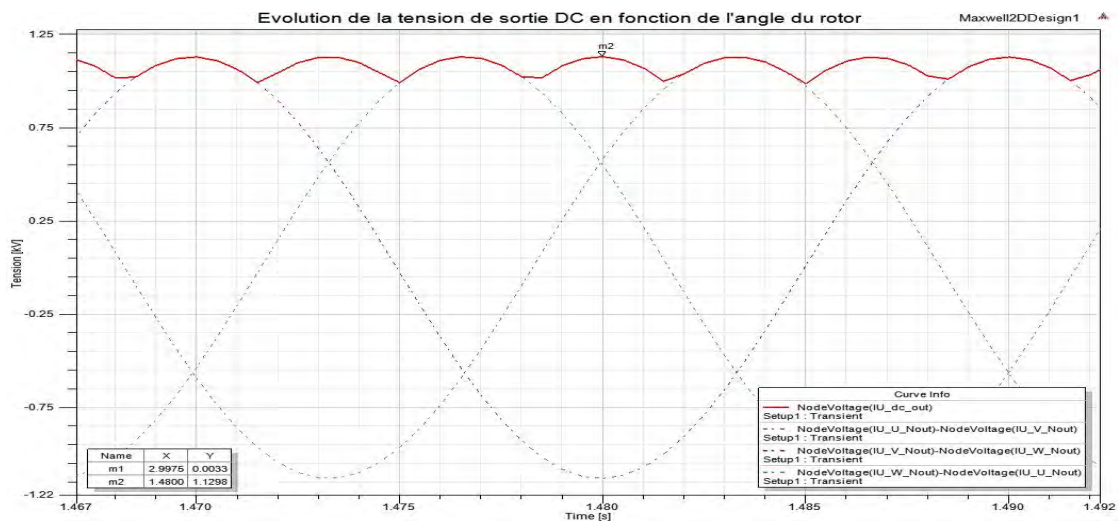


Figure 111 : Tension continue maximale redressée

En position maximale, la tension de sortie vaut au maximum 1130 [V] pour une ondulation de 150 [V]. Cela représente une tension moyenne de 1175 [V] :

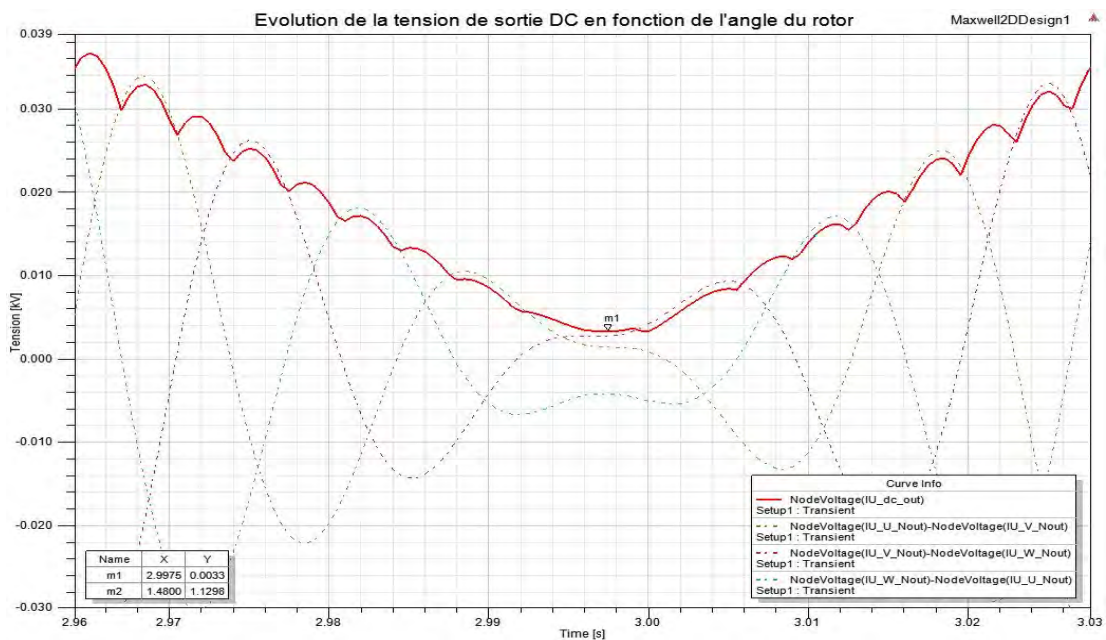


Figure 112 : Tension continue minimale redressée

La tension minimale qu'il est possible d'obtenir est de 3.3 [V]. Dans les plus basses tensions, les chutes de tension présentes sur les deux diodes en série sont visibles. Pour cette application, cela ne joue aucun rôle étant donné la marge de tension disponible.

11.5.3 Simulation avec machine à courant continu

Une seconde simulation est effectuée avec comme charge une machine à courant continu.

Pour cela, une machine à courant continu ABB de 30 [kW] dont les caractéristiques sont connues est ajoutée comme charge au redresseur. La machine fonctionne avec une tension induite de 500 [V]. Sa résistance est de 0.7 [Ohm] et son inductance est de 19 [mH] (l'excitation de la machine n'est pas prise en compte). Le schéma équivalent de cette machine est présenté à la figure suivante :

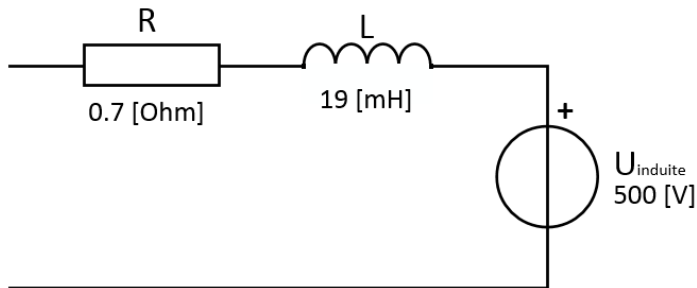


Figure 113 : Schéma équivalent de la machine à courant continu

Le régulateur à induction est alimenté par une tension de phase de 230 [V_{rms}]. Le rotor est placé dans une position permettant d'obtenir une tension continue moyenne avoisinant 520 [V]. Cela permet d'obtenir un courant raisonnable pouvant correspondre à l'essai d'une machine à courant continu.

Le résultat de la simulation pour la tension (en rouge) et le courant continu (en violet) de la machine à courant continu se trouve à la figure suivante :

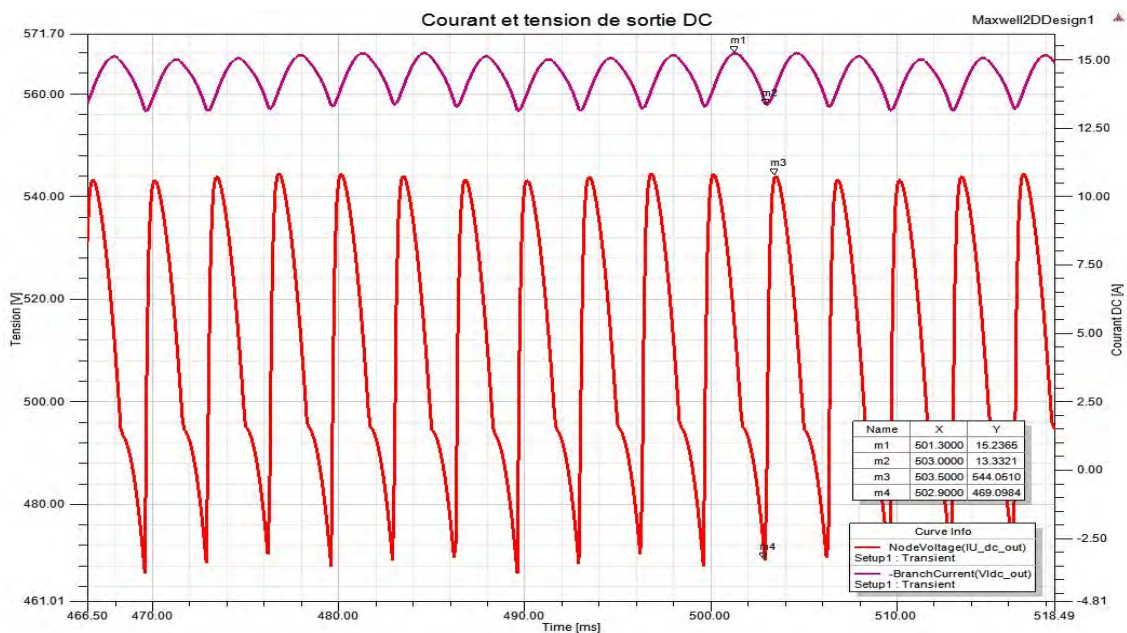


Figure 114 : Courant (violet) et tension (rouge) aux bornes de la machine à courant continu

Le courant présente une ondulation de 2 [A] avec une valeur maximale de 15.3 [A]. Cela correspond à un courant moyen d'environ 14.6 [A]. La tension varie entre 544 [V] et 472 [V]. Cela représente une ondulation de 72 [V] et une valeur moyenne d'environ 520 [V].

Le courant d'une phase de sortie du régulateur à induction (trait trié noir), le courant d'une branche de diode du redresseur (bleu) et le courant passant par le circuit d'aide à la commutation RC de la même branche (brun) sont représentés à la figure suivante :

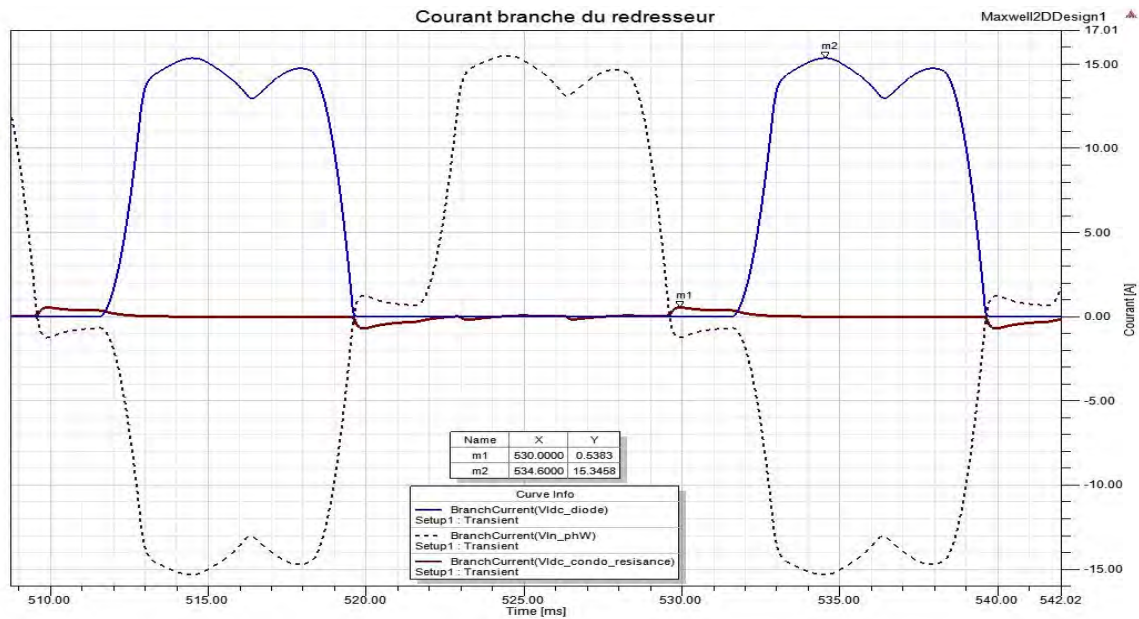


Figure 115 : Courant dans une branche du redresseur triphasé

Le courant passant par la diode est une alternance du courant de sortie du régulateur à induction. Des courants de forme carrée sont typiques lors de l'utilisation du redresseur avec de grosses inductances. Cela peut poser des problèmes de rejet d'harmonique dans le réseau. Cet élément n'est pas toutefois pas étudié pour cette installation étant donné le peu d'essais réalisés et le temps d'essai limité.

Rien que par le blocage de la diode, un faible courant (~ 0.5 [A]) circule dans le circuit RC. Il est difficile de simuler le circuit d'aide à la commutation étant donné que la caractéristique exacte de la diode n'est pas connue.

Le courant du réseau (rouge), le courant au stator (noir) et le courant au rotor (bleu) sont présentés à la figure suivante :

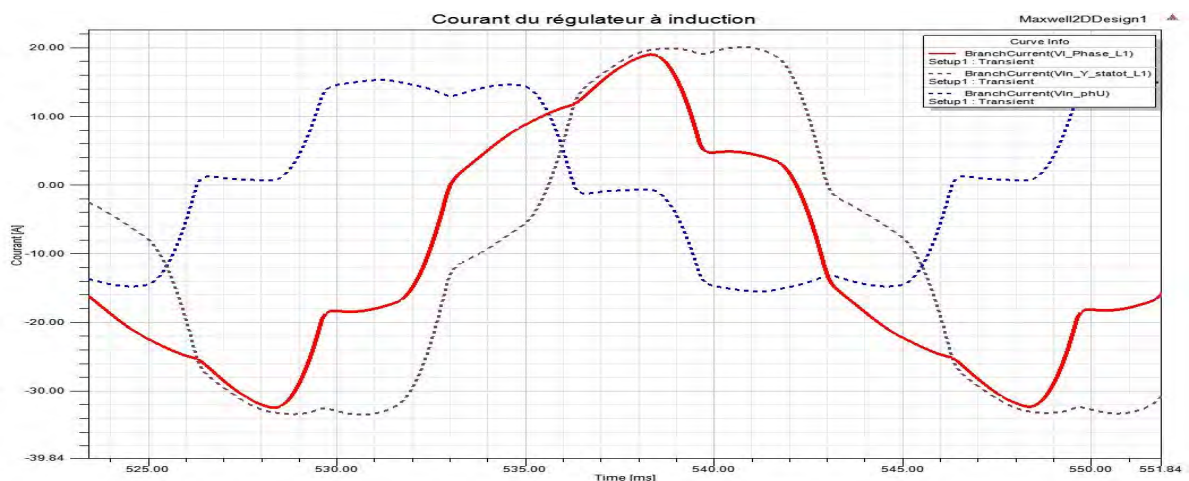


Figure 116 : Courant du régulateur à induction avec machine à courant continu

Pour des raisons de temps de simulation, les courants de la figure précédente ne se trouvent pas totalement en régime stationnaire. Cette figure est présente pour illustrer la forme du courant du réseau lors de cet essai.

11.6 Réalisation

Etant donné l'intérêt de Valélectirc pour l'obtention d'une source de tension continue, le circuit redresseur est réalisé. L'idée est de placer le matériel dans un coffre comprenant un câble d'entrée triphasé avec prise et un câble de sortie DC avec des cosses. Cela permet au système de venir se brancher à n'importe quel réseau triphasé.

11.6.1 Liste du matériel

Le matériel nécessaire à la fabrication et à l'estimation du prix se trouve dans le tableau suivant :

Description	Fournisseur	Quantité	Prix
Diode de redressement de puissance	Distrelec	12	480
Résistance pour le circuit d'aide à la commutation	Distrelec	12	600
Condensateur pour le circuit d'aide à la commutation	Distrelec	6	48
Armoire électrique en acier avec plaque de base	Electropoint	1	200
Ventilateur et filtre pour armoire	Electropoint	1	100
Plaque de base pour résistance	Récomecanique	3	50
Barre cuivre pour support des diodes	Récomecanique	11	200
Matériel de câblage (isolateur, câble, cosse,...)	Valélectric	-	50
Total			1728

Tableau 44 : Liste du matériel et estimation du prix du circuit de redressement

La totalité du matériel avoisine les 1750 CHF. Il s'agit d'un prix raisonnable étant donné la large gamme d'utilisation du redresseur.

11.6.2 Plan d'implantation

L'implantation du système n'est pas simple étant donné le nombre de composants. Tous les composants sont fixés sur des barres de cuivres montées sur des isolateurs. Les résistances sont montées sur une plaque de base en matière isolante. La figure suivante montre le montage mécanique du système :

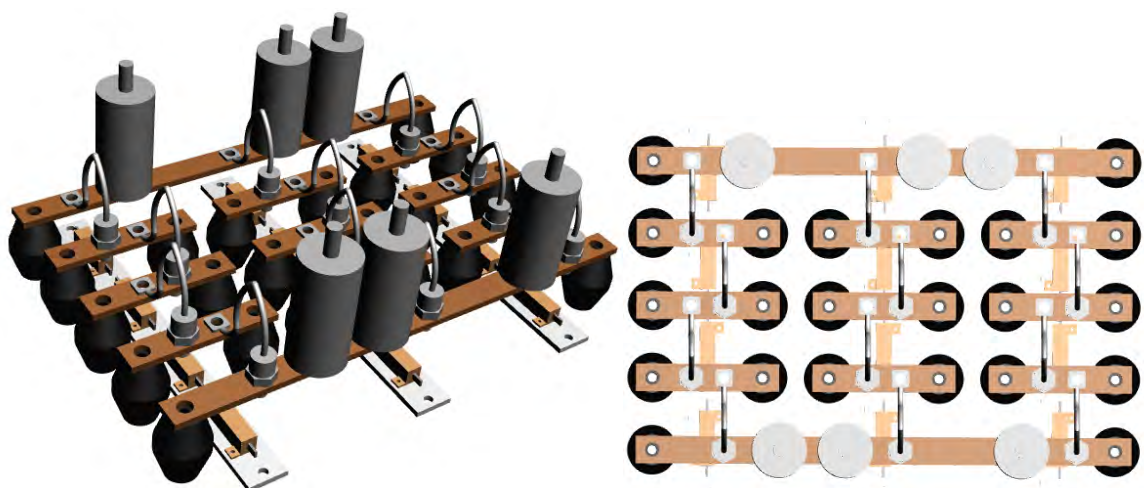


Figure 117 : Plan mécanique du redresseur triphasé

Le tout est installés dans une armoire électrique sur laquelle un ventilateur et un filtre sont montés afin d'évacuer la chaleur du système.

Le plan d'implantation et les dimensions mécaniques du système sont disponibles à l'Annexe 12 .

11.6.3 Photos du système

Le câblage du système a été réalisé dans les ateliers de Valélectric par mes soins. Le système est monté sur roulette afin de faciliter le transport. Les photos du système final sont présentées aux figures suivantes :

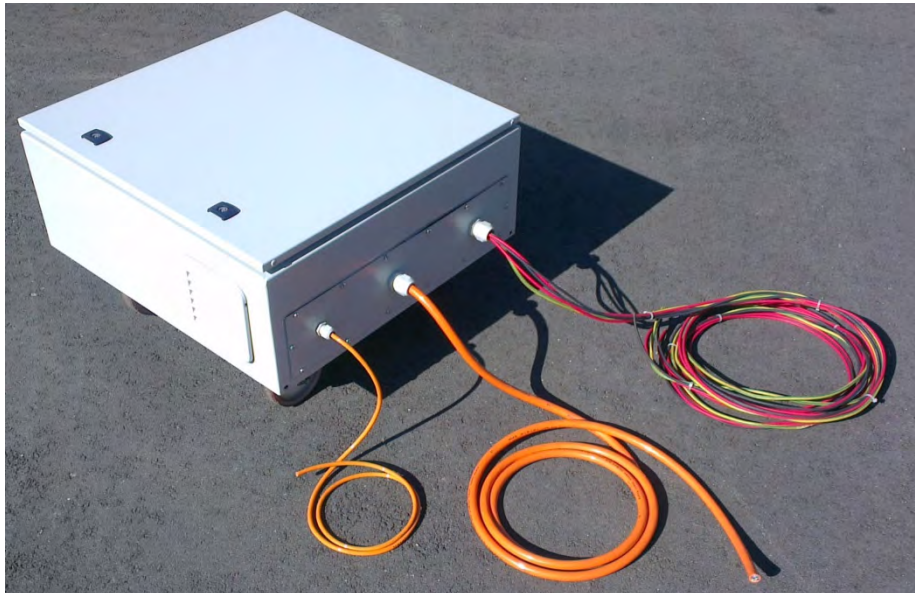


Figure 118 : Coffret du redresseur : vue extérieure



Figure 119 : Coffret du redresseur : vue intérieure

11.7 Essai du redresseur

Le redresseur triphasé est monté en sortie du régulateur à induction. Deux essais sont réalisés : un à vide et un avec une charge ohmique. Aucune machine à courant continu n'étant disponible, l'essai sera réalisé lors de la prochaine révision de ce type de machine.

Les instruments de mesures utilisés sont les même que pour l'essai du régulateur à induction.

11.7.1 Essai à vide

Dans un premier temps, le redresseur est testé à vide afin de vérifier les valeurs limites.

- **Position minimale**

Le régulateur à induction est placé en position minimale afin de mesurer la tension continue de sortie dans cette configuration.

La figure suivante présente le résultat de la mesure. La courbe bleue est la tension continue de sortie et la courbe violette est la tension de ligne de sortie du régulateur à induction :

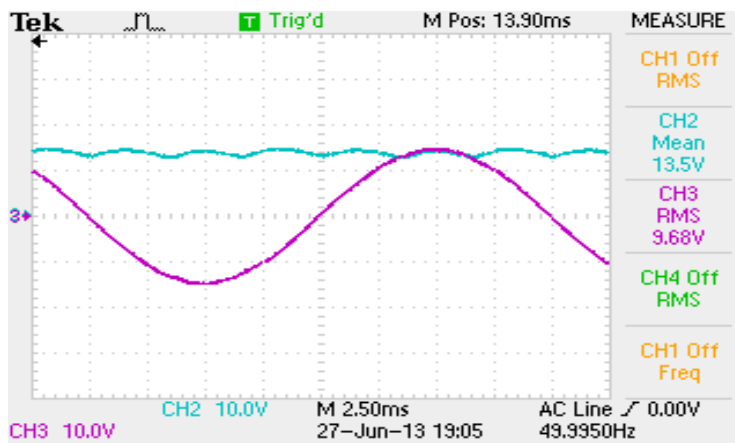


Figure 120 : Mesures du redresseur à vide en position minimale

La tension de ligne est mesurée à 9.68 [V]. La tension continue moyenne minimale est de 13.5 [V].

- **Position maximale**

La tension continue de sortie maximale étant supérieure à 800 [V], les sondes différentielles de tensions saturent. C'est pourquoi un voltmètre analogique *Métrieux MX-1* a dû être utilisé. En position maximale, la tension continue de sortie vaut 1090 [Vdc]. Elle a été calculée à 1076 [Vdc]. Cela représente une erreur de 1.2%. Elle provient du fait que la tension induite est supérieure au calcul.

A la figure suivante est présenté l'image de l'oscilloscope pour une tension continue de sortie de 821 [V]. Il s'agit de la valeur maximale mesurable par les sondes de tensions différentielles. La courbe bleue est la tension continue de sortie et la courbe violette est la tension de ligne de sortie du régulateur à induction :

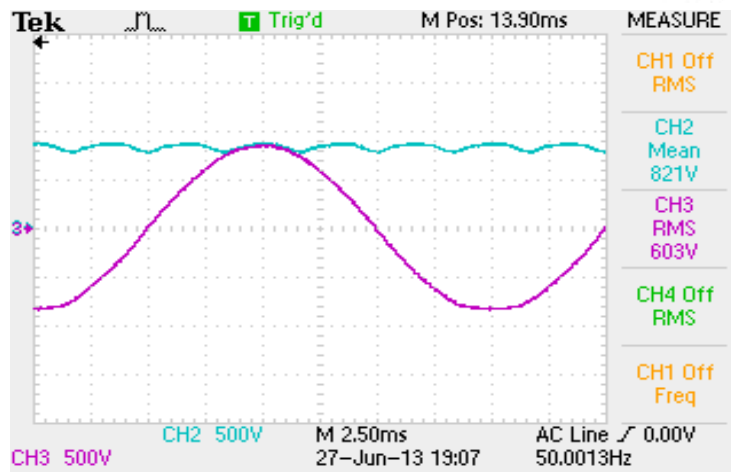


Figure 121 : Mesures du redresseur à vide en position intermédiaire

11.7.2 Charge ohmique

Une charge ohmique de 193 [Ω] est branchée en sortie du redresseur. Elle est donnée pour un courant maximum de 1 [A]. La tension sera adaptée en conséquence.

Le schéma de la mesure est présenté à la figure suivante :

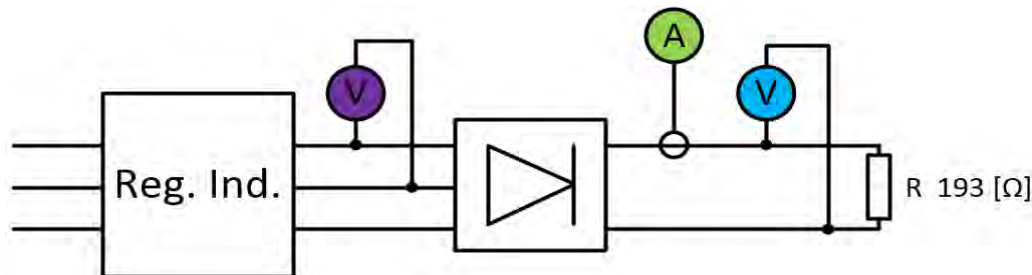


Figure 122 : Schéma de la mesure ohmique du redresseur

Le résultat de la mesure à l'oscilloscope est présenté à la figure suivante :

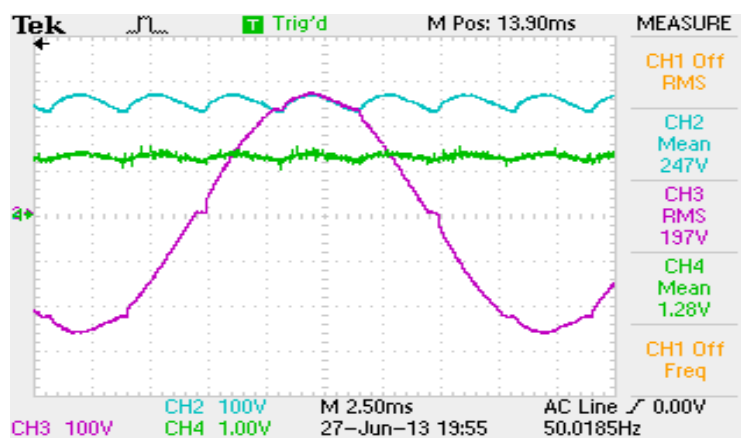


Figure 123 : Mesures du redresseur avec charge ohmique - Situation sur la charge

La tension continue moyenne sur la charge est de 247 [V] et le courant continu moyen est de 1.28 [A]. Il y a quelques sauts sur la tension de ligne de sortie du régulateur à induction lors du blocage et lors du passage à zéro des diodes.

Les courants du régulateur à induction sont mesurés et présentés à la figure suivante. Les courants sont les suivants : en jaune le courant du réseau, en violet le courant au stator et en bleu le courant au rotor (échelle 5x plus grande).

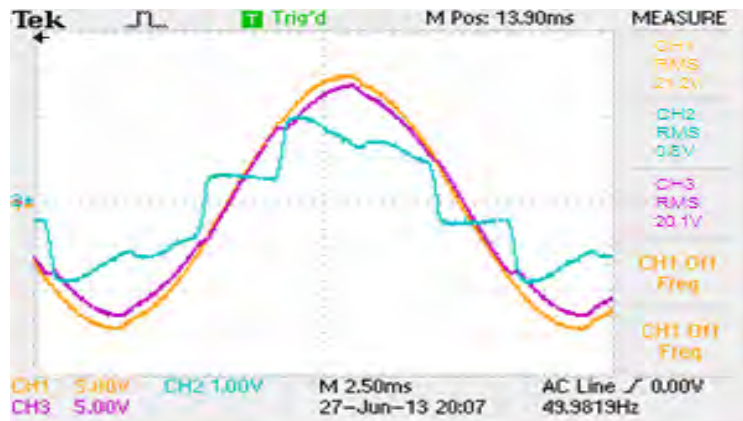


Figure 124 : Mesure du redresseur avec charge ohmique – Courant du régulateur à induction

Le courant au rotor à une forme carré car il dépend du courant continu de sortie. La forme de ce courant est semblable au résultat obtenu lors de la simulation (Figure 115) pour une amplitude plus petite. Les courants au stator et le courant sont quant à eux de forme sinusoïdale.

12 IMPLANTATION DU REGULATEUR A INDUCTION

Ce chapitre traite de l'utilisation du régulateur à induction au sein de Valélectric. L'avant-projet d'implantation de la machine dans les locaux et d'automatisation de la machine sera réalisé. Les impacts d'un essai sur la consommation électrique de l'entreprise seront étudiés.

12.1 Intégration de la machine à l'entreprise

Valélectric teste actuellement toutes ses machines à l'aide d'un autotransformateur dans ses locaux principaux. Ces dernières années, une nouvelle halle a été construite pour servir de lieu de révision pour les grosses machines. Malheureusement la machine doit être transportée dans les locaux principaux pour les essais.

Un dépôt de stockage se trouve actuellement sur le site de l'entreprise. Dans les projets à court terme, il est prévu de le détruire et d'en reconstruire un neuf. Le régulateur et l'autotransformateur y seront installés. Des câbles relieront les nouveaux lieux de test aux appareils. Les machines seront commandées à distance.

La photo suivante montre le dépôt et le lieu de test dans les locaux principaux. Une tranchée déjà existante relie les deux bâtiments. Le câble y sera inséré.



Figure 125 : Plan d'intégration des machines de test

La figure suivante montre le second lieu de test dans la halle de montage. Le câble d'alimentation passe par les canaux à câble existants à l'intérieur du bâtiment :



Figure 126 : Plan d'intégration des machines de test

12.1.1 Dimensionnement du câble d'alimentation

Les câbles doivent pouvoir supporter un courant de 100 [A] pour une tension maximale de phase de 460 [V]. La longueur du câble est estimée dans les deux cas à 30 [m].

Le tableau suivant résume les principales informations pour des câbles de différentes sections. Ce tableau est valable pour des câbles triphasés avec terre d'une longueur de 30 [m] et dans chaque phase passe 100 [A] :

Section [mm ²]	6	10	16	25	35
Densité [A/mm ²]	17	10	6	4	3
R [mΩ]	84	50	32	20	14
ΔU [V]	8,4	5,0	3,2	2,0	1,4
P _{cu} [W]	2520	1512	945	605	432
m _{cu} [kg]	4,8	8,1	12,9	20,2	28,2

Tableau 45 : Tableau des informations liées au câble de différentes sections

Selon la norme sur les installations à basse tension (NIBT), la section d'un câble se détermine en fonction du courant, du type de conducteur, du mode de pose et du nombre de circuits présents. [4]

Concernant le câble reliant le dépôt au lieu de test n°1 :

- ♦ Il s'agit d'un câble multiconducteur placé dans une conduite encastrée dans le sol (mode de pose B2). Le nombre de câbles placés dans la conduite ne dépassant pas 4, la section du câble doit être de **35 [mm²]**. [4]

Concernant le câble reliant le dépôt au lieu de test n°2 :

- ♦ Il s'agit d'un câble multiconducteur placé dans un chemin de câbles perforés (mode de pose E). Le nombre de câbles placés dans le chemin à câbles ne dépassant pas 8, la section du câble doit être de **35 [mm²]**. [4]

12.1.2 Protection contre les surintensités

L'alimentation électrique du bâtiment est équipée de fusibles HPC 125 [A] classe TT (déclenchement retardé de 100 [ms] à 1 [s]). Ce fusible a été déterminé en fonction des besoins de l'entreprise avec les services industriels.

Les principaux consommateurs de l'entreprise sont :

- ◆ le four pour le séchage des machines ;
- ◆ les essais des machines électriques ;
- ◆ les ateliers de montage (éclairage, outil, pont roulant, tournage...).

Chacun de ces groupes est protégé en respectant la sélectivité. C'est-à-dire que la branche en défaut ne doit pas couper injustement une branche saine.

Actuellement l'autotransformateur utilisé pour les essais est branché sur un groupe de fusibles HPC 100 [A] classe TT (déclenchement retardé de 100 [ms] à 1 [s]). Le régulateur à induction sera protégé selon le même principe.

Au besoin, afin de ne pas provoquer la fusion des fusibles d'entrée du bâtiment, les corps de chauffe du four peuvent être déclenchés durant les essais d'une machine de grosse puissance.

12.1.3 Alimentation de la machine

L'alimentation du bâtiment est limitée par les services industriels à 125 [A] et la machine sera limitée par un groupe de fusible de 100 [A]. Au chapitre 10.7, le courant d'alimentation a été déterminé à 110 [A]. Avec ces fusibles, les capacités du régulateur à induction ne peuvent pas être complètement exploitées mais le système de protection de Valélectric n'est pas modifié.

Il est à noter qu'actuellement les machines de puissances importantes ne sont pas testées à tension nominale afin de ne pas consommer trop de courant. Le but est surtout de tester mécaniquement la machine afin de relever d'éventuelles vibrations ou défauts d'équilibrage.

12.2 Automatisation du système

Chaque année Valélectric forme des apprentis automaticiens. En quatrième année, afin de valider leur formation, ils doivent réaliser un TIP (travail interdisciplinaire sur un projet). Il s'agit d'un projet pratique réparti sur une durée de 120 heures. L'idée serait de confier l'automatisation de la machine comme travail final pour un apprenti.

• Principe d'automatisation de la machine

L'automatisation du régulateur à induction devra prendre en compte les points suivants :

- ◆ commande la machine à distance depuis les deux lieux de test, avec verrouillage ne permettant pas l'alimentation des deux cotés en même temps ;
- ◆ utilisation d'une interface homme machine simple sous forme de boutonnerie ou d'un écran tactile ;
- ◆ impossibilité de démarrer le régulateur à induction s'il n'est pas en position minimale;
- ◆ surveillance de la tension de sortie de machine afin de ne pas suralimenter le système à tester ;

- ♦ surveillance de la température des bobinages de la machine et coupure de l'alimentation en cas de surchauffe ;
- ♦ gestion de la ventilation en prenant en compte la température des bobines ;
- ♦ système de coupure d'urgence assurant la sécurité des personnes en cas de problème ;
- ♦ mode d'utilisation « expert », avec un système de clé ou de code, permettant le démarrage à partir de n'importe quelle tension, ne limitant pas la gamme de tension de sortie et mettant en garde en cas de surchauffe des bobinages sans éteindre l'alimentation.

Un tableau comportant l'automate programmable et la partie de puissance se trouvera à proximité du régulateur à induction dans le nouveau dépôt. Les deux lieux de test seront équipés du même coffret comportant l'interface homme/machine et le système d'arrêt d'urgence.

12.3 Coût et taxation des services industriels

Dans ce sous-chapitre, le système de taxation des services industriels et l'impact d'un essai sur la facture mensuelle sera étudié.

12.3.1 Système de taxation

La consommation énergétique de l'entreprise est taxée selon :

- **Compteur de puissance active**

La puissance active est facturée en fonction du coût fixé par les services industriels selon qu'il s'agit d'une heure pleine ou d'une heure creuse :

- ♦ heure pleine : 0.171 [CHF/kWh] (janvier 2013) ;
- ♦ heure creuse : 0.131 [CHF/kWh] (janvier 2013).

- **Compteur de puissance réactive**

La puissance réactive est facturée si elle dépasse 50% de la puissance totale, cela représente un $\cos(\varphi)$ inférieur à 0.9. Le système de facturation est réalisé par palier.

- **Compteur de pointe**

Une taxe est prélevée aux entreprises sur le plus haut quart-d'heure du mois de puissance active. Chaque kiloWatt est facturé 4.50 CHF. Cette taxe est indépendante du reste de la consommation mensuelle.

Exemple :

Si la courbe mensuelle de consommation de puissance active est la suivante :

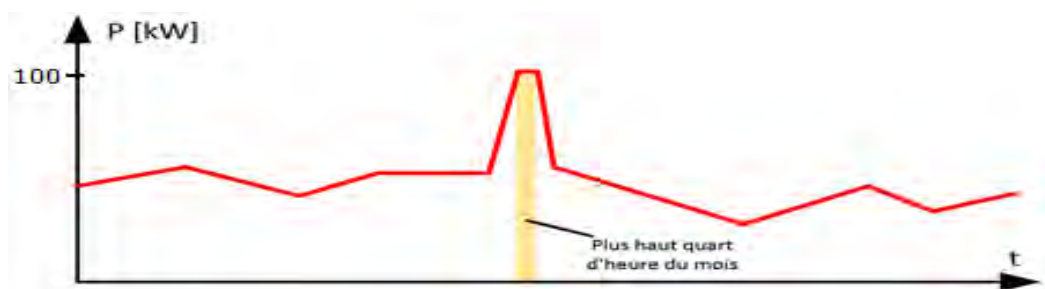


Figure 127 : Exemple de courbe de consommation

Une taxe de 4.5 [CHF/kW] sera prélevée sur le plus haut quart-d'heure du mois.

Pour cet exemple, la taxe s'élève à : $4.5 \cdot 100 = 450$ [CHF].

- **Abonnement**

Un abonnement de 30.9 CHF est prélevé mensuellement.

- **Service-système du réseau de transport**

Une taxe de participation au transport de 0.46 [ct./kWh] est prélevée sur l'ensemble de l'énergie consommée dans le mois.

12.3.2 Coût et impact d'un essai

L'essai d'une machine électrique à vide consomme de la puissance purement réactive ($\cos(\varphi) \sim 0.1$). Il ne dure généralement pas plus de cinq minutes et le nombre d'essais journaliers est environ deux. La proportion de puissance réactive des essais par rapport à la puissance active consommée durant le mois devient négligeable.

En regardant l'historique des factures d'électricité de l'entreprise, la puissance réactive n'a jamais été facturée.

L'essai des machines électriques à vide n'a pas d'impact sur la facture électrique mensuelle.

13 CONCLUSIONS

Les objectifs du travail de diplôme ont tous été atteints :

- Etude théorique, modélisation analytique et numérique de la machine

Le principe de fonctionnement de la machine a pu être défini. Le modèle analytique du régulateur à induction a été déterminé et vérifié par différentes mesures. Le système a pu être simulé par éléments finis avec le logiciel Maxwell.

- Définir un nouveau bobinage pour obtenir une tension de sortie proche de 0 [V]

A l'aide du modèle analytique et de la simulation par éléments finis, un nouveau bobinage a pu être défini. La machine a ensuite été bobinée à neuf puis remontée dans les ateliers de Valélectric Farner SA.

- Comparer l'étude théorique avec les mesures sur site

Une campagne de test sur le régulateur à induction a été effectuée. Dans l'ensemble, les résultats des mesures et des calculs correspondent bien. La tension de phase de sortie en position minimale est de sept Volts et en position maximale de quatre-cent-soixante-sept Volts.

- Définir les limites d'essais en tenant compte des limites thermiques et magnétiques

Les limites d'utilisation de la machine ont été fixées grâce aux essais thermiques effectués sur le système. Afin que le bobinage rotorique ne dépasse pas cent-vingt degré Celsius, le courant du rotor ne doit pas dépasser quatre-vingt ampères et la ventilation forcée doit être enclenchée.

- Etudier et dimensionner l'alimentation et les protections

Le régulateur à induction sera protégé à l'aide d'un groupe de fusibles de cent ampères HPC retardés. L'alimentation du bâtiment est limitée par les services industriels à cent-vingt-cinq ampères.

- Etudier la possibilité de monter un redresseur triphasé à la sortie du régulateur

Un redresseur triphasé a été dimensionné en ajoutant aux diodes une protection contre les surtensions. Il permet de supporter toute la gamme de tension de sortie du régulateur à induction et autorise un courant jusqu'à cent-trente ampères. Le tout a été monté et testé.

- Etudier la commande à distance de la machine

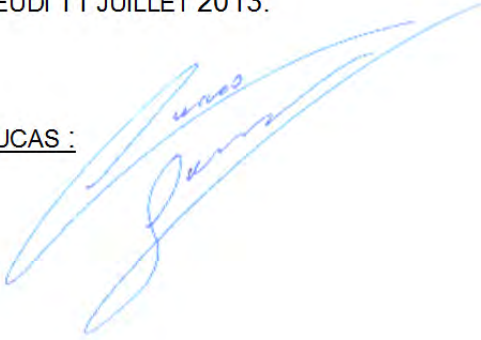
Le régulateur à induction sera installé dans un nouveau dépôt annexe durant l'année prochaine. L'automatisation de la machine sera effectuée dans le cadre d'un travail de fin d'apprentissage. Le dimensionnement des câbles et le principe d'automation du régulateur à induction ont été réalisés.

En résumé, la machine a été testée dans sa configuration d'origine, puis démontée afin de connaître ses caractéristiques. Cela a permis de définir un modèle analytique et de la simuler par éléments finis afin de déterminer un nouveau bobinage permettant d'obtenir une tension de sortie proche de zéro. Le régulateur à induction a ensuite été bobiné à neuf et remonté. Pour finir, une campagne de tests a été effectuée sur la machine remise à neuf permettant de vérifier son bon fonctionnement. Un redresseur triphasé venant se brancher en sortie du système a aussi été dimensionné et réalisé. Le prix de la totalité de la remise à neuf, comprenant les heures du personnel, le matériel et le redresseur revient à environ douze mille francs.

Valélectric dispose désormais d'une seconde source de tension triphasée variable et d'une source de tension continue variable lui permettant ainsi de tester tous les types de moteurs électriques.

SION, LE JEUDI 11 JUILLET 2013.

FARNER LUCAS :



14 REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant participé au projet sans qui sa réalisation aurait été impossible :

- ♦ à toute l'équipe de Valélectric Farner SA qui a contribué à la remise à neuf du régulateur à induction dans les meilleurs délais ;
- ♦ à Claude Jaquier, bobineur de Valélectric, pour son aide sur les aspects pratiques du bobinage et pour le bobinage à neuf de la machine dans un temps très court ;
- ♦ à Hans-Peter Biner, professeur Hes, pour son assistance lors du dimensionnement du redresseur triphasé ;
- ♦ à David Melly, assistant et collaborateur scientifique, pour l'initialisation et l'aide apportée concernant la simulation par éléments finis ;
- ♦ à Christian Farner, mandant et chef d'entreprise, pour les moyens mis en œuvre lors de la remise à neuf de la machine, pour sa confiance envers le dimensionnement apporté et pour sa critique concernant le travail ;
- ♦ à Samuel Chevailler, professeur Hes, pour son suivi tout au long du travail, pour ses conseils et critiques, pour sa disponibilité et pour sa qualité de pédagogue.

16 SOURCES

- [1] J. Pyrhönen, T. Jokinen et V. Hrabovcovà, «Design of Rotating Electrical Machines,» John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [2] J. Chatelain, Traité d'électricité, Volume X : Machines électriques, 1015 Lausanne: Presses polytechniques romandes, 1983.
- [3] H.-P. Biner, «Electronique industrielle : Labo Eol-1,» Hes-so Valais, Sion, 2012.
- [4] ASE Romandie, «NIN COMPACT NIBT,» 2001.
- [5] «Wikipedia,» Induction regulator, [En ligne]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Induction_regulator.
- [6] M. Liwschitz, Calcul des machines électriques : Tome I, Lausanne: SPES Lausanne, 1967.
- [7] M. Liwschitz, Calcul des machines électriques : Tome II, Lausanne: SPES Lausanne, 1967.
- [8] «Réducteur ACBAR,» [En ligne]. Available: <http://starpsi.free.fr/Documents/Mecanique/video.htm>.
- [9] H. Farner, «Travail de diplôme : Etude des caractéristiques d'un moteur à effet pelliculaire,» Ecole technique supérieure, Fribourg, 1976.
- [10] C. Farner, «Travail de diplôme : Alternateurs bipolaires pour groupes électrogènes,» EINEV, Yverdon-Les-Bains, 1982.
- [11] M. Kostenko et L. Piotrovski, Machines électriques, Tomes II, Éditions de Moscou (Mir), 1969 (réédité en 1979).

17 ANNEXES

Annexe 1 : Script de calcul Matlab du schéma équivalent pour un régulateur à induction

Annexe 2 : Rapport de mesures : Essai d'un transformateur dans la configuration du régulateur à induction

Annexe 3 : Script de calcul Matlab des composants du schéma équivalent

Annexe 4 : Principe de bobinage en demi-rainure

Annexe 5 : Schéma de bobinage du rotor avant la remise à neuf

Annexe 6 : Schéma de bobinage du stator avant la remise à neuf

Annexe 7 : Facteur de remplissage, résistance des enroulements et masse du cuivre en fonction du type de bobinage

Annexe 8 : Schéma du nouveau bobinage du rotor

Annexe 9 : Schéma du nouveau bobinage du stator

Annexe 10 : Courbe des tests réalisés pour le calcul analytique, la simulation et la mesure

Annexe 11 : Fiche technique des composants pour le circuit de redressement (diodes, résistance, condensateur)

Annexe 12 : Schéma électrique et plan d'implantation du redresseur triphasé

18 LISTE DES SYMBOLES

A	m^2	Section des conducteurs
b_2	m	Ouverture d'encoche
b_1	m	Largeur d'encoche
B	T	Induction magnétique
C	F	Capacité
h_1	m	Hauteur de l'encoche avec largeur constante
h_2	m	Hauteur de la fermeture d'encoche
H	Am	Champ magnétique
I	A	Courant
K_c	-	Facteur de Carter
k_{w1}	-	Facteur de bobinage total pour la première harmonique
k_{zw1}	-	Facteur de bobinage pour la première harmonique
k_{sq1}	-	Facteur d'inclinaison des tôles de fer pour la première harmonique
k_{cu}	-	Facteur de remplissage
$L_{\sigma r}$	H	Inductance de fuite du rotor
L_h	H	Inductance de champ principal
$L_{\sigma N}$	Ω	Inductance de fuite des encoches
L_w	H	Inductance de fuite des têtes de bobines
$L'_{\sigma r}$	H	Inductance de fuite du rotor rapportée au stator
L_w	H	Inductance de fuite des têtes de bobines
l_{ew}	m	Décalage de la tête de bobine (sens de la longueur active)
l	m	Longueur active du fer de la machine
m	kg	Masse
M	Nm	Couple
n_s	tr/s	Vitesse du champ tournant au stator
N	$spires$	Nombre de spires en série par phase
P	W	Puissance active
Q	Var	Puissance réactive
Q	-	Nombre d'encoches total
q	-	Nombre d'encoches par pôle et phase
R_s	Ω	Résistance de l'enroulement statorique
R_{fe}	Ω	Résistance équivalente du fer
R_r	Ω	Résistance de l'enroulement rotorique
R'_r	Ω	Résistance de l'enroulement rotorique rapportée au stator
S	VA	Puissance apparente
t	s	Temps
U	V	Tension
w_{ew}	m	Longueur de la tête de bobine (sens du pas polaire)
$X_{\sigma s}$	Ω	Réactance inductive de fuite au stator
$X_{\sigma r}$	Ω	Réactance inductive de fuite au rotor
X_w	Ω	Réactance inductive de fuite des têtes de bobines
$X_{\sigma N}$	Ω	Réactance inductive de fuite des encoches
$X'_{\sigma r}$	Ω	Réactance inductive de fuite au rotor rapportée au stator
α_{elec}	-	Angle électrique de la tension induite par rapport à la tension du réseau
α_{mec}	-	Angle mécanique du rotor
δ	m	Entrefer
η	-	Rendement
$\Delta\theta$	$^{\circ}C$	Différence de température
λ_w	-	Facteur des têtes de bobines 1
λ_{lew}	-	Facteur des têtes de bobines 2
$\lambda_{\sigma N}$	-	Facteur de la forme d'encoche
μ_0	Tm/A	Perméabilité magnétique du vide
μ_{fe}	Tm/A	Perméabilité magnétique
ρ	Ωm	Résistivité
ρ	kg/m^3	Masse volumique
τ_p	m	Pas polaire
τ_u	m	Pas d'encoche

Annexe 1

**Script de calcul Matlab du modèle
analytique du régulateur à induction**

Script de calcul Matlab du schéma équivalent pour un régulateur à induction

```

clear all
clc

%% Schéma équivalent
disp('Valeur des composants du schéma équivalent');
disp('=====');
disp(' ');

Xs=613e-3*j
Xrprim=Xs
Rs=52e-3
Rrprim=.35
u=1.95
Rfe=196.36
Xh=21.32*j

%% Entrer les paramètres
disp(' ');
disp('Entrer la valeur de la charge');
disp('=====');
disp(' ');
Zload=input('Zload = ');

disp(' ');
disp('Entrer la tension de phase RMS ');
disp('=====');
disp(' ');
U1=input('U1 = ');

disp(' ');
disp('Entrer l angle de déphasage de la tension induite(Rappel: Umin=0[°]
Umax=180[°])');
disp('=====');
disp(' ');
phi=input('phi = ');

%% Calcul intermédiaire
u_complexe=(u*cos(phi*pi/180)+j*u*sin(phi*pi/180));
Z1=Xs+Rs;
Z2=Xrprim+Rrprim;
Z3=(Rfe*Xh)/(Rfe+Xh);

%% Calcul des courant et tension INPUT/OUTPUT

%Partie 1 source en cc coté charge
Zequ_1=Z1+1/(1/(Z3)+1/(Z2+Zload*u^2));

I1_1=U1/Zequ_1;
Im_1=I1_1*(Z2+Zload*u^2)/(Z3+(Z2+Zload*u^2));
I2prim_1=-I1_1*(Z3)/(Z3+(Z2+Zload*u^2));
U2prim_1=-I2prim_1*(Zload*u^2);

```

```

U2_1=U2prim_1/u_complexe;
I2_1=-U2_1/Zload

%Partie 2 source en cc coté réseau

Zequ_2=(Z2/(u^2))+Zload+1/(1/(Z1/(u^2))+1/(Z3/(u^2)));
I2_2=U1/Zequ_2;
U2_2=U1-Zload*I2_2;

U2prim_2=U2_2*u_complexe;
I2prim_2=U2prim_2/(Z2+(1/(1/Z3+1/Z1)));

Im_2=I2prim_2*Z1/(Z1+Z3);
I1_2=-I2prim_2*Z3/(Z1+Z3);

Im_2a=(I2_2*((Z1/(u^2))/(Z3/(u^2)+Z1/(u^2))))/u_complexe;
I1_2a=-(I2_2*((Z3/(u^2))/(Z3/(u^2)+Z1/(u^2))))/u_complexe;
I2_2a=Im_2a-I1_2a;

%Addition

I1=I1_2+I1_1;
Im=Im_2+Im_1;
I2=I2_2+I2_1;
U2=U2_2+U2_1;

Iload=I2;
Uload=U1-U2;
Ireseau=I1+I2;

%% Calcul des puissances
Sin = 3*U1*conj(Ireseau);
Sout = 3*Uload*conj(Iload);
Sstator = 3*U1*conj(I1);
Srotorreseau = 3*U1*conj(Iload);

%% Affichage des perte cuivre et du temps d'essai
Ccu=380;
mstator=35;
mrotor=25;
Pcus=3*Rs*abs(I1)^2;
Pcur=3*Rrprim/(abs(u)^2)*abs(Iload)^2;
ts=mstator*Ccu*130/Pcus*1/3600;
tr=mrotor*Ccu*130/Pcur*1/3600;

disp(' ');
disp('Perte cuivre totale');
disp('=====');
disp(' ');
disp('Perte cuivre au stator : ');
disp(Pcus)
disp('Perte cuivre au rotor : ');

```

```

disp(Pcur)

disp(' ');
disp('Temps essai en heures et secondes pour échauffement adiabatique');
disp('=====');
disp(' ');
disp('Stator : ');
disp(ts)
disp(ts*3600)
disp('Rotor: ');
disp(tr)
disp(tr*3600)

%% Clacul du couple

M=(real(Sout)-real(Srotorreseau))/(2*25*pi);

disp(' ');
disp('Couple de la machine en Nm');
disp('=====');
disp(' ');
disp(M);

%% Rendement de la machine

n=real(Sout)/real(Sin)*100;

disp(' ');
disp('Rendement de la machine en %');
disp('=====');
disp(' ');
disp(n);

%% Affichage des valeurs

%Affichage des tensions
disp(' ');
disp('Valeur RMS des courants et tensions');
disp('=====');
disp(' ');
disp('Tension du réseau: ');
disp(abs(U1))
%disp(angle(U1)*180/pi)
disp('Tension induite: ');
disp(abs(U2))
%disp(angle(Uinduite)*180/pi)
disp('Tension dans la charge: ');
disp(abs(Uload))
%disp(angle(Uload)*180/pi)
disp(' ');
disp(' ');

%Affichage des courants
disp('Courant du réseau: ');
disp(abs(Ireseau))

```

```

%disp(angle(Ireseau)*180/pi)
disp('Courant dans la charge: ');
disp(abs(Iload))
%disp(angle(Iload)*180/pi)
disp('Courant au primaire: ');
disp(abs(I1))
%disp(angle(I1)*180/pi)
disp('Courant magnétisant: ');
disp(abs(Im))
%disp(angle(Im)*180/pi)
disp(' ');
disp(' ');

%Affichage des puissances
disp('Puissances et cos(phi) au réseau: ');
disp(abs(Sin))
disp((Sin))
disp(cos(angle(Sin)))
disp('Puissance et cos(phi) en sortie : ');
disp(abs(Sout))
disp((Sout))
disp(cos(angle(Sout)))
disp('Puissance et cos(phi) au primaire: ');
disp(abs(Sstator))
disp(Sstator)
disp(cos(angle(Sstator)))
disp('Puissance et cos(phi) au secondaire (coté tension réseau): ');
disp(abs(Srotorreseau))
disp(Srotorreseau)
disp(cos(angle(Srotorreseau)))

%% Affichage des graphiques des tensions
tfinal=20e-3;
tpas = 0.25e-3;
f=50;
t = (0:tpas:tfinal);
figure('Name','Tensions du régulateur à induction','NumberTitle','off')
plot(t,sqrt(2)*abs(U1)*sin(2*pi*f*t+angle(U1)),'b',t,sqrt(2)*abs(Uload)*sin(2*
pi*f*t+angle(Uload)) , 'm',t,sqrt(2)*abs(U2)*sin(2*pi*f*t+angle(U2)) , 'g');
grid on
legend('Tension du réseau','Tension sur la charge','Tension induite')
title('Tensions du régulateur à induction');
xlabel('Temps [s]');
ylabel('Tension [V]');

%% Affichage des graphiques des courants
tfinal=20e-3;
tpas = 0.25e-3;
f=50;
t = (0:tpas:tfinal);
figure('Name','Courants du régulateur à induction','NumberTitle','off')
plot(t,sqrt(2)*abs(Ireseau)*sin(2*pi*f*t+angle(Ireseau)),'b',t,sqrt(2)*abs(I1)
*sin(2*pi*f*t+angle(I1)) , 'm',t,sqrt(2)*abs(Iload)*sin(2*pi*f*t+angle(Iload))
, 'g');
grid on

```

```

legend('Courant du réseau','Courant au primaire','Courant dans la charge')
title('Courants du régulateur à induction');
xlabel('Temps [s]');
ylabel('Courant [A]');

%% Affichage des Tensions intermédiaire
tfinal=20e-3;
tpas = 0.25e-3;
f=50;
t = (0:tpas:tfinal);
figure('Name','Situation réseau/charge','NumberTitle','off')
plot(t,sqrt(2)*abs(U1)*sin(2*pi*f*t+angle(U1)),'--
r',t,sqrt(2)*abs(Ireseau)*sin(2*pi*f*t+angle(Ireseau)) , '--
b',t,sqrt(2)*abs(Uload)*sin(2*pi*f*t+angle(Uload))
,'g',t,sqrt(2)*abs(Iload)*sin(2*pi*f*t+angle(Iload)) , 'k');
grid on
legend('Tension réseau','Courant réseau','Tension charge','Courant charge')
title('Situation réseau/charge');
xlabel('Temps [s]');
ylabel('Tension [V]-Courant [A]');

```

Annexe 2

**Rapport de mesures : Essai d'un
transformateur dans la configuration du
régulateur à induction**

RAPPORT DE MESURES

ESSAI D'UN TRANSFORMATEUR DANS LA CONFIGURATION DU RÉGULATEUR À INDUCTION



RÉDACTEUR

FARNER LUCAS

TRAVAIL DE DIPLÔME

ANNEXE N°2

ORIENTATION

POWER AND CONTROL

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	But de l'essai	1
1.2	Matériel.....	1
1.3	Photos du matériel	1
2	DÉTERMINATION SCHÉMA EQUIVALENT DU TRANSFORMATEUR.....	2
2.1	Mesure des enroulements.....	2
2.2	Essai à vide	3
2.2.1	Mesure.....	3
2.2.2	Calcul des composants.....	3
2.3	Essai en court-circuit	3
2.3.1	Mesure	4
2.3.2	Calcul des composants.....	4
3	MESURE DANS LA CONFIGURATION DU RÉGULATEUR À INDUCTION.....	5
3.1	Définition	5
3.2	Mesure à vide.....	6
3.2.1	Remarque sur le sens des tensions induites.....	6
3.2.2	Positon maximum	7
3.2.3	Positon minimum	9
3.3	Mesure en court-circuit.....	11
3.3.1	Positon maximum	11
3.3.2	Positon minimum	13
3.4	Mesure sur charge ohmique.....	15
3.4.1	Positon maximum	15
3.4.2	Positon minimum	18
3.5	Mesure sur charge inductive	21
3.5.1	Positon maximum	21
3.5.2	Positon minimum	24
4	DISCUSION DES RÉSULTATS	27
5	SCRIPT DE CALCUL MATLAB	27

1 INTRODUCTION

1.1 But de l'essai

Le but est de câbler un transformateur dans la même configuration qu'un régulateur à induction afin d'y effectuer des mesures et de les comparer avec le schéma équivalent proposé.

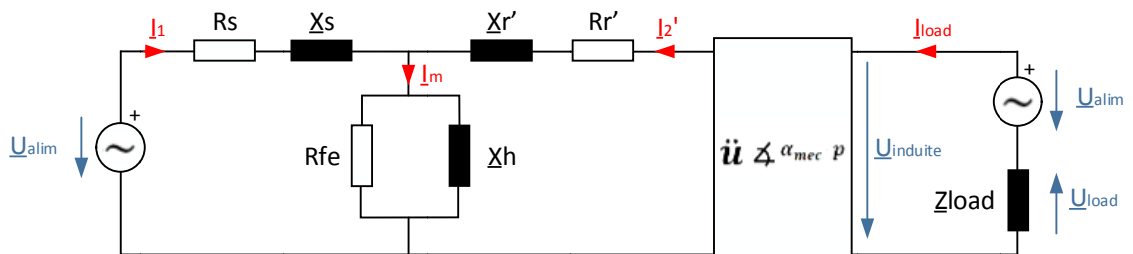


Figure 1 : Schéma équivalent proposé pour un régulateur à induction

Les résultats des mesures seront comparés aux calculs effectués sur le schéma équivalent et permettra sa validation.

1.2 Matériel

Les essais ont été réalisés dans le laboratoire AE04 de la Hes-so Valais.

Ci-dessous la liste des instruments de mesure utilisés pour les tests :

Description	Marque	Type
Oscilloscope	Tektronix	TDS 3054
Voltmètre	Fluke	115
Wattmètre	Fluke	434
Pince ampéremétrique	Fluke	375

Tableau 1 : Tableau des instruments de mesures

1.3 Photos du matériel

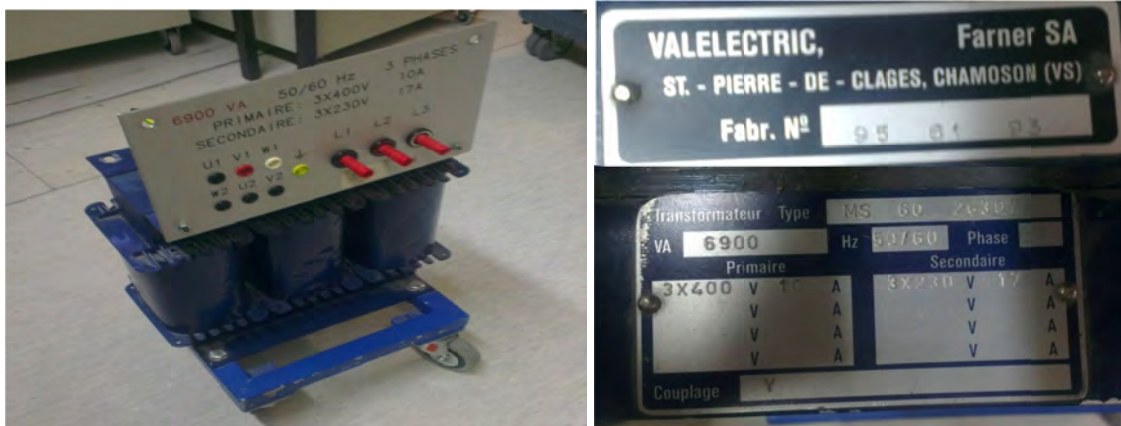


Figure 2 : Photos du transformateur et de ses caractéristiques

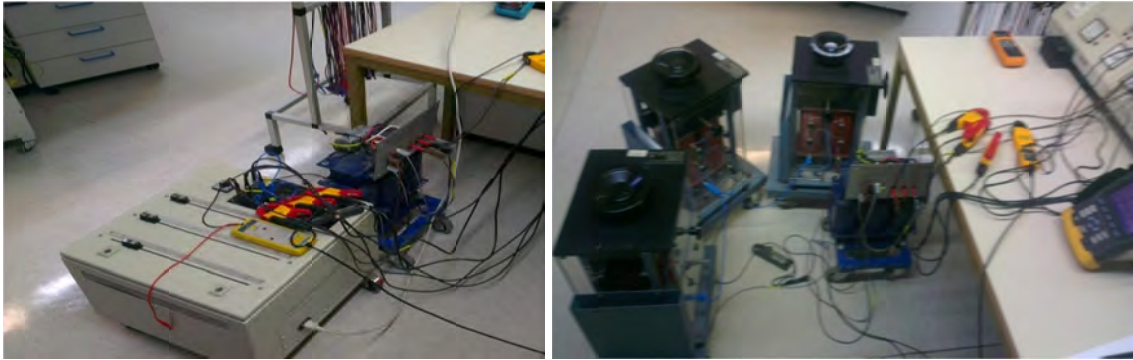


Figure 3 : Photos des charges utilisées (gauche charge ohmique, droite charge inductive)

2 DETERMINATION SCHEMA EQUIVALENT DU TRANSFORMATEUR

La première partie consiste à déterminer les éléments du schéma équivalent du transformateur :

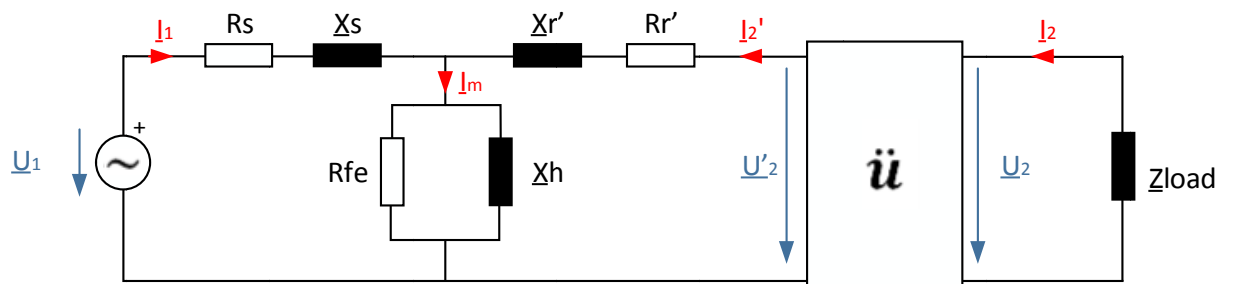


Figure 4 : Schéma équivalent du transformateur

A cette fin, un essai est réalisé sur le transformateur à vide et en court-circuit.

Sur l'image suivante sont présentés les branchements au primaire et au secondaire :

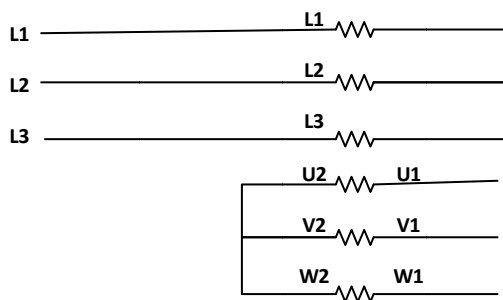


Figure 5 : Mesures en transformateur

2.1 Mesures des enroulements

La résistance d'un enroulement au primaire a été mesurée à 119 [mΩ]. La résistance d'un enroulement au secondaire a été mesurée à 298 [mΩ].

$$R_s = 119[m\Omega]$$

La résistance $R_{r'}$ pourra être déterminée une fois le rapport de transformation connu.

2.2 Essai à vide

Le schéma du transformateur à vide est le suivant :

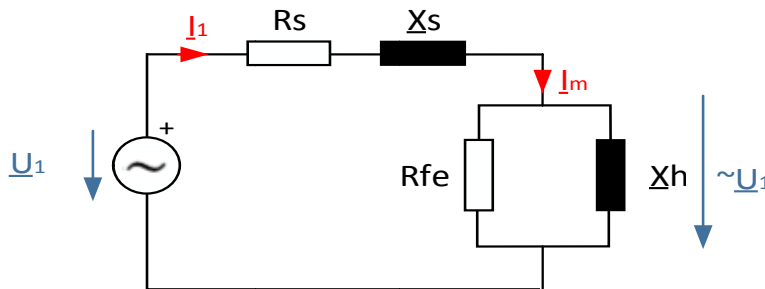


Figure 6 : Schéma équivalent du transformateur à vide

Cela permettra de calculer le rapport de transformation, Rfe et Xh.

2.2.1 Mesures

Les mesures suivantes ont été réalisées :

$$I_{L2} = 0.56 [A] \quad U_{L2-N} = 132 [V] \quad P_{tot} = 121,3[W] \quad U_{V1-N} = 220 [V]$$

2.2.2 Calcul des composants

$$\dot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{132}{220} = 0.6$$

$$R_r' = R_r \cdot \dot{u}^2 = 298 \cdot 0.6^2 = 107 [m\Omega]$$

La chute de tension sur la résistance R1 et sur Xs est négligée car elle est très petite.

$$U_{R1} = R1 \cdot I_1 = 0.119 \cdot 0.56 = 66[mV] \approx 0$$

$$R_{fe} = \frac{U_1^2}{\left(\frac{P_{tot}}{3}\right)} = \frac{132^2}{\left(\frac{121.3}{3}\right)} = 431 [\Omega]$$

$$X_h = \frac{U_1^2}{Q_{phase}} = \frac{U_1^2}{\sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 - \left(\frac{P_{tot}}{3}\right)^2}} = \frac{132^2}{\sqrt{(132 \cdot 0.56)^2 - \left(\frac{121.3}{3}\right)^2}} = 280.5 [\Omega]$$

2.3 Essai en court-circuit

Le schéma du transformateur en court-circuit est le suivant :

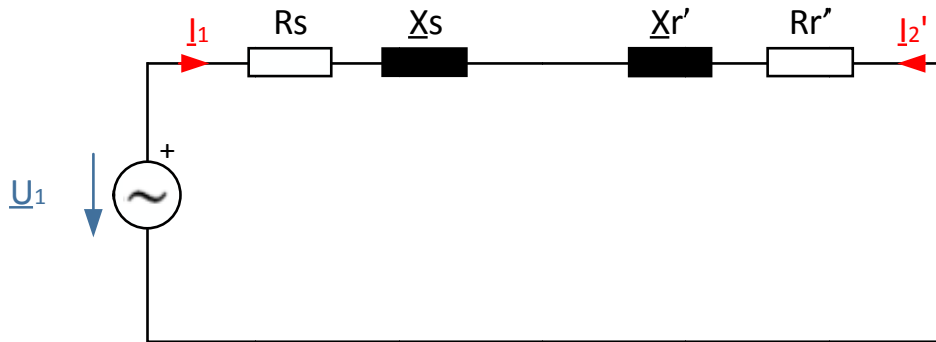


Figure 7 : Schéma équivalent du transformateur en court-circuit

La branche magnétisante peut être négligée car ses composants sont très grands par rapport à $X_{r'}$ et $R_{r'}$.

2.3.1 Mesures

Les mesures suivantes ont été réalisées :

$$I_{L2} = 7.6 \text{ [A]} \quad U_{L2-N} = 1.77 \text{ [V]} \quad P_{tot} = 39 \text{ [W]}$$

2.3.2 Calcul des composants

$$X_{\sigma} = \frac{Q_{phase}}{I_1^2} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 - \left(\frac{P_{tot}}{3}\right)^2}}{(I_1)^2} = \frac{\sqrt{(1.77 \cdot 7.6)^2 - \left(\frac{39}{3}\right)^2}}{(7.6)^2} = 0.06 \text{ [\Omega]}$$

Les impédances X_s et $X_{r'}$ sont supposées identiques.

$$X_{\sigma s} = X_{\sigma r'} = \frac{X_{\sigma}}{2} = \frac{0.06}{2} = 0.03 \text{ [\Omega]}$$

La valeur des résistances R_s et $R_{r'}$ sont vérifiées. La mesure en court-circuit donne le résultat suivant :

$$R'_{tot1} = \frac{P_{tot}}{3 \cdot I_1^2} = \frac{39}{3 \cdot 7.6^2} = 0.225 \text{ [\Omega]}$$

L'addition des résistances déterminées précédemment donne le résultat suivant :

$$R_{tot1} = R_{r'} + R_s = 0.119 + 0.107 = 0.226 \text{ [\Omega]}$$

Les résultats coïncident parfaitement.

Les composants du schéma équivalent du transformateur sont désormais connus. Ils peuvent être appliqués au script de calcul Matlab.

Le script de calcul permet de choisir la tension d'alimentation, la valeur de la charge placée en étoile ainsi que l'angle (ici 0° ou 180°). En fonction de ces paramètres, il calcule les valeurs des différents courants, tensions et puissances et affiche la situation sur différents plots.

Le script est présent à la fin de cette annexe.

3 MESURES DANS LA CONFIGURATION DU REGULATEUR A INDUCTION

Le transformateur est câblé dans la même configuration qu'un régulateur à induction. Des mesures sont effectuées à vide, en court-circuit et en charge. Les résultats de ces dernières seront comparés au script de calcul.

3.1 Définitions

Dans ce chapitre les termes ci-dessous seront utilisés afin de simplifier la lecture :

- Tension d'entrée := Tension d'alimentation électrique ;
- Tension de sortie := Tension de sortie en fonction du sens des bornes homologues ;
- Position minimale := Position où la tension de sortie est à sa valeur minimum, cela correspond à un angle de 180° ;
- Position maximale := Position où la tension de sortie est à sa valeur maximum, cela correspond à un angle de 0° .

Les puissances seront mesurées à quatre endroits :

- Réseau (*Res.*) := Puissance délivrée par la source ;
- Sortie := Puissance absorbée par la charge (côté de la tension réglée);
- Primaire (*Prim.*) := Puissance de la partie en étoile du transformateur (L1-L2-L3) ;
- Secondaire (*Sec.*) := Puissance sur le même enroulement que la charge avec la tension du réseau.

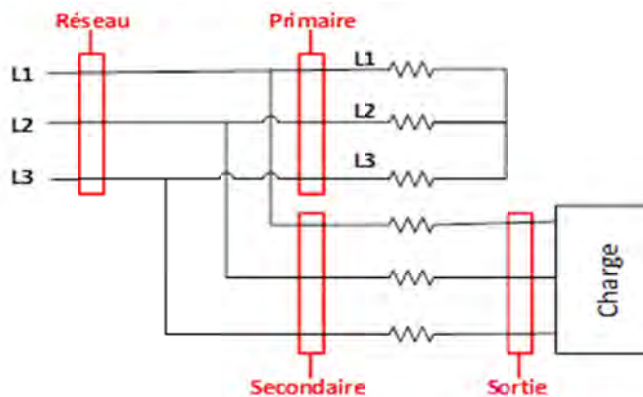


Figure 8 : Schéma explicatif des mesures de puissances

3.2 Mesures à vide

3.2.1 Remarques sur le sens des tensions induites

Sur un régulateur à induction la tension induite au rotor est défini comme sur l'image suivante :

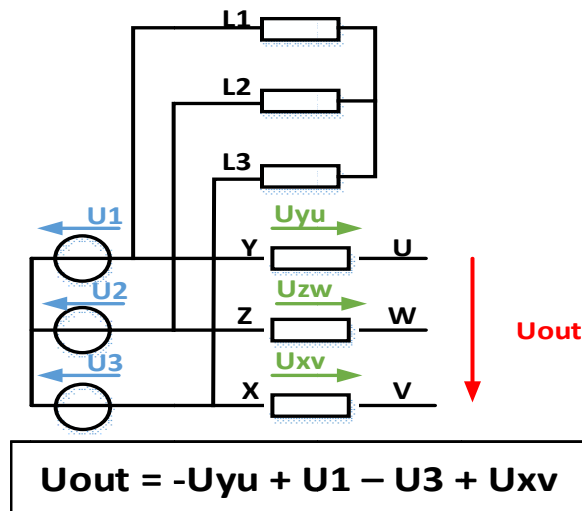


Figure 9 : Schéma d'un régulateur à induction avec le sens des tensions induites

Le fait de faire varier l'angle déphase la tension induite. L'image suivante montre l'évolution de la tension de sortie pour une tension induite en phase et en opposition de phase avec la tension du réseau :

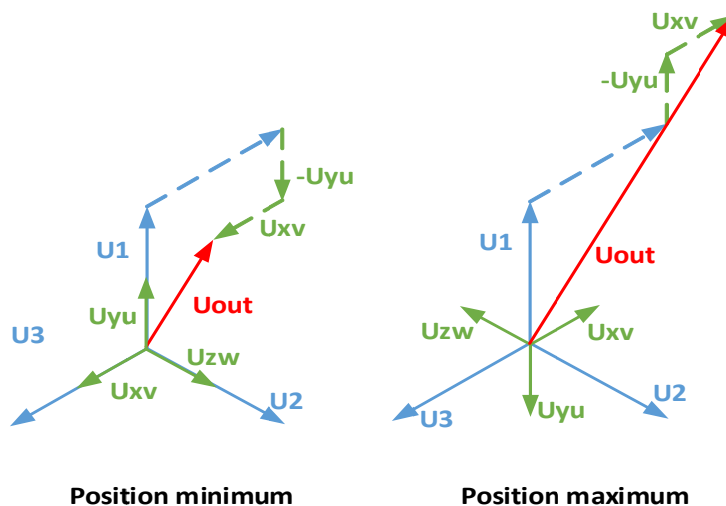


Figure 10 : Explicatif vectoriel des tensions

En définissant la tension induite dans ce sens, quand elle est en phase avec la tension du réseau, la tension de sortie est minimale et quand elle est en opposition de phase, la tension du réseau est maximale.

Pour l'essai du transformateur dans la configuration d'un régulateur à induction, la tension induite est définie de la même façon. Il y a cependant une différence : pour faire varier la tension de sortie, il faut inverser le sens des bornes du secondaire.

3.2.2 Positon maximale

♦ Schéma de la mesure

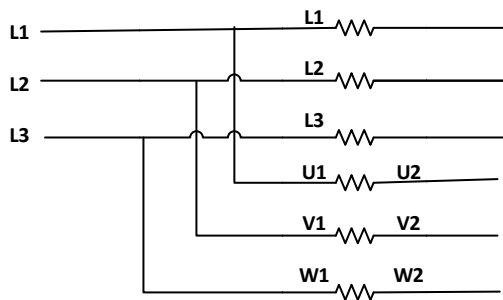


Figure 11 : Schéma de la mesure à vide en position maximale

♦ Tableau des résultats

	Courant [A]	Tension [V]		
	Reseau	Reseau	Sortie	Induite
Mesure	0,127	22,80	60,90	38,50
Calcul	0,097	22,80	60,78	37,98
Erreur [%]	23,54	0,00	0,20	1,35

Figure 12 : Tableau des résultats de la mesure à vide en position maximale

NB : Les tensions du tableau sont des tensions de phase (phase-neutre). Les valeurs sont des grandeurs efficaces.

Les résultats entre la mesure et les calculs correspondent bien. Il y a une erreur de 30 [mA] sur le courant du réseau mais cela est acceptable.

♦ Courbes des tensions et des courants (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 1 (jaune) : Tension d'alimentation L2-N ;
- Canal 2 (bleu) : Tension de sortie V2-N ;
- Canal 3 (vert) : Tension induite V2-V1 ;
- Canal 4 (violet) : Courant du réseau phase L2.

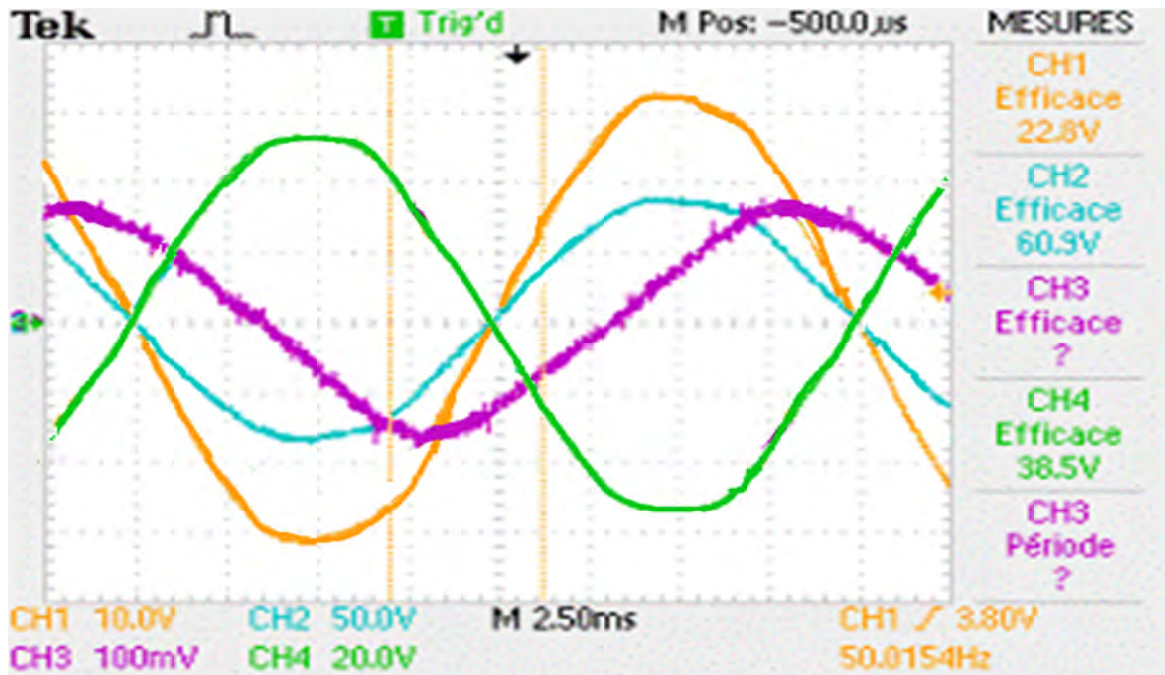


Figure 13 : Courbes mesurées des courants et tensions de la mesure à vide en position maximale

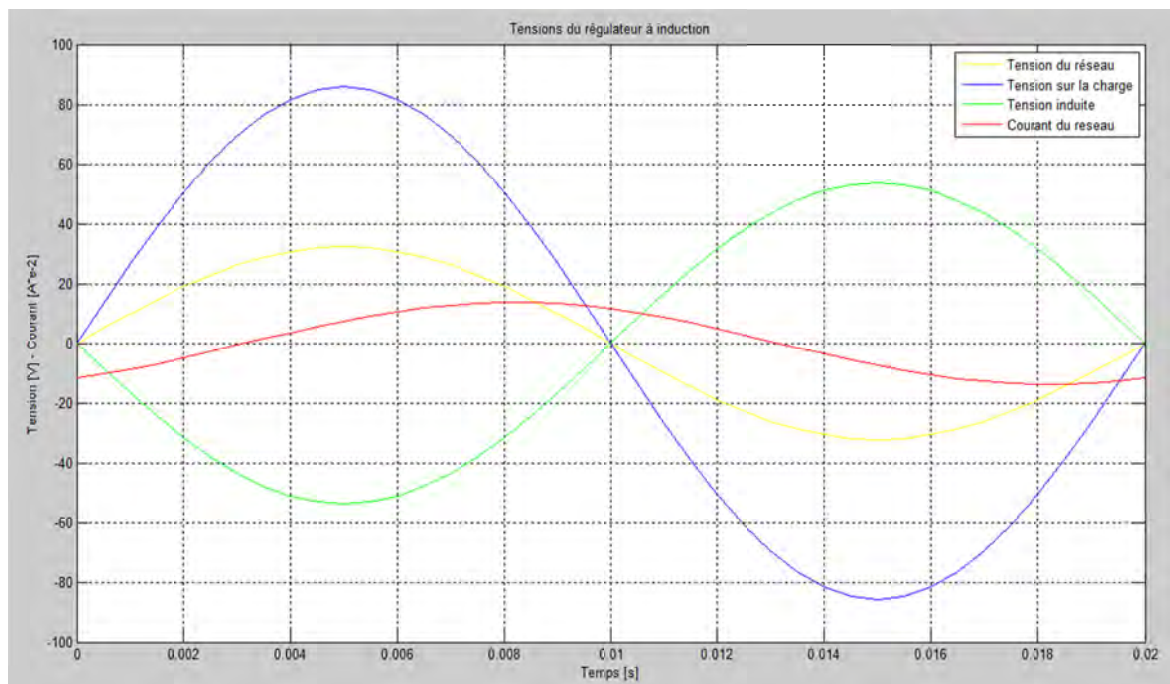


Figure 14 : Courbes calculées des courants et tensions de la mesure à vide en position maximale

Entre la mesure et le calcul les résultats coïncident parfaitement. La tension de sortie et la tension du réseau sont bien en phase, tandis que la tension induite est déphasée de 180°. Le courant du réseau est quant à lui en retard de 90° par rapport à la tension du réseau car il s'agit d'un système inductif.

3.2.3 Positon minimale

♦ Schéma de la mesure

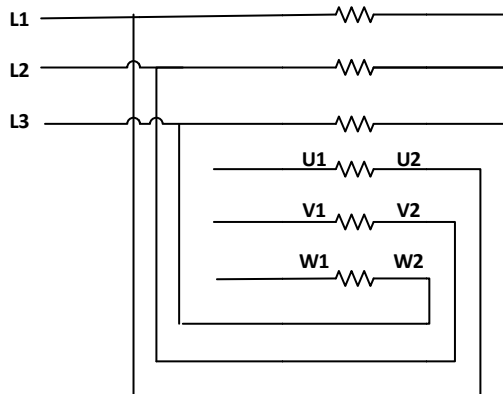


Figure 15 : Schéma de la mesure à vide en position minimale

♦ Tableau des résultats

	Courant [A]	Tension [V]		
	Reseau	Reseau	Sortie	Induite
Mesure	0,127	22,80	-15,10	38,50
Calcul	0,097	22,80	-15,16	37,98
Erreur [%]	23,54	0,00	-0,37	1,35

Figure 16 : Tableau des résultats de la mesure à vide en position minimale

NB : Les tensions du tableau sont des tensions de phase (phase-neutre). Les valeurs sont des grandeurs efficaces.

Les résultats entre la mesure et les calculs correspondent bien. Il y a une erreur de 30 [mA] sur le courant du réseau mais cela est acceptable. Le courant à vide est le même qu'en position maximale, cela est logique étant donné que seul le sens des bornes homologue a changé.

♦ Courbes des tensions et des courants (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 1 (jaune) : Tension d'alimentation L2-N ;
- Canal 2 (bleu) : Tension de sortie V1-N ;
- Canal 3 (vert) : Tension induite V1-V2 ;
- Canal 4 (violet) : Courant du réseau phase L2.

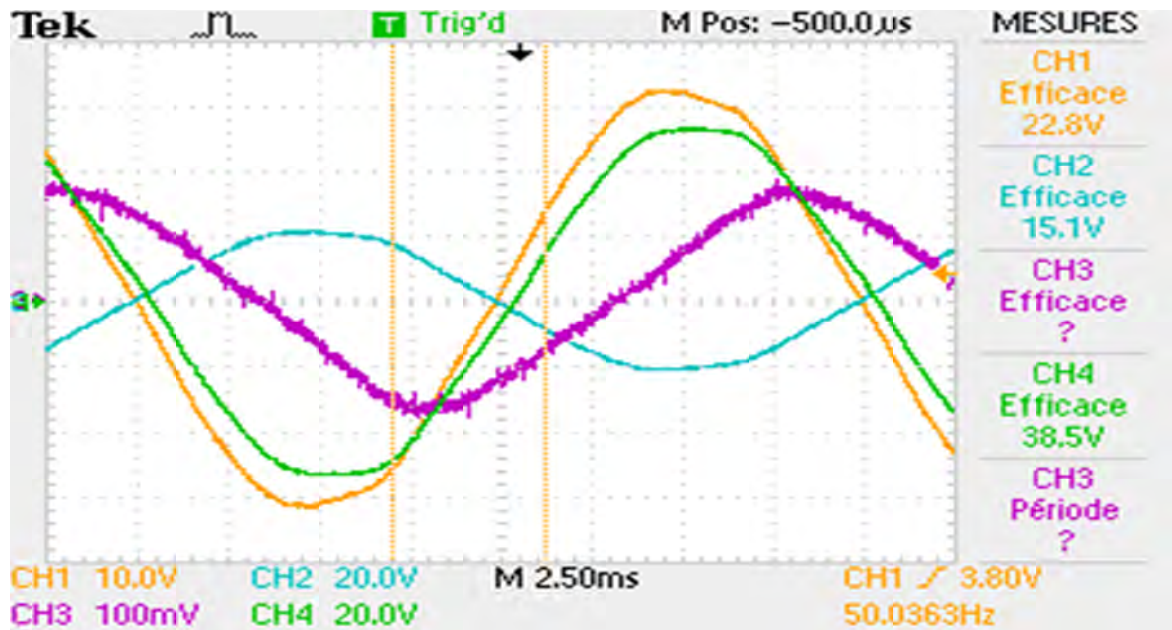


Figure 17 : Courbes mesurées des courants et tensions de la mesure à vide en position minimale

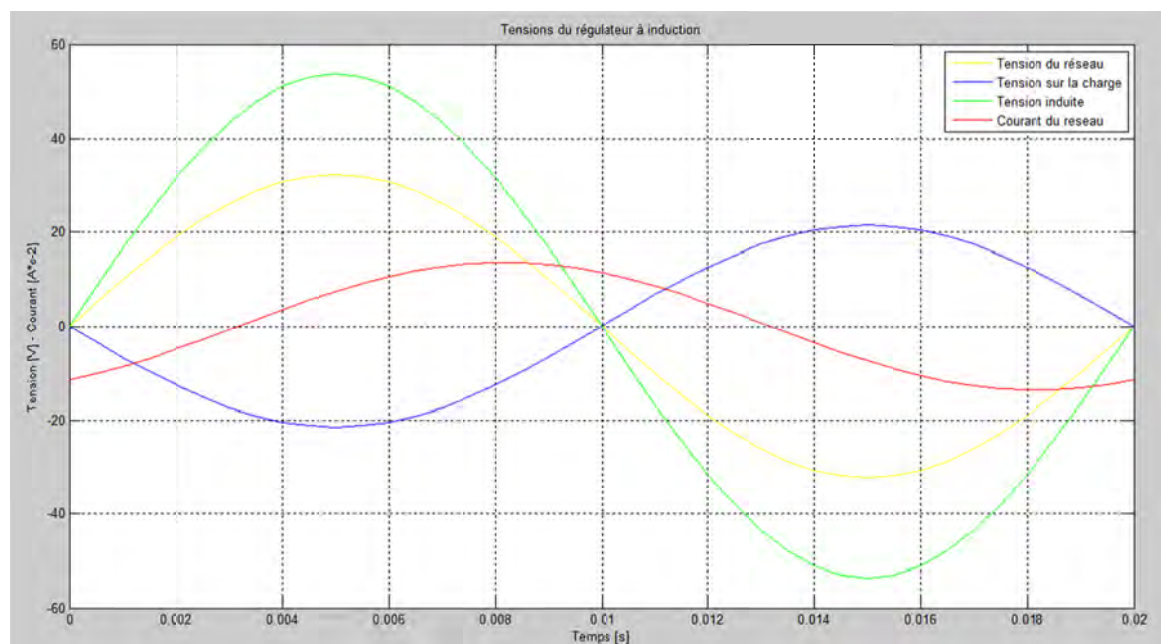


Figure 18 : Courbes calculées des courants et tensions de la mesure à vide en position minimale

Entre la mesure et le calcul les résultats coïncident parfaitement. La tension induite et la tension du réseau sont bien en phase, tandis que la tension de sortie est déphasée de 180°. Le courant du réseau est quant à lui en retard de 90° par rapport à la tension du réseau car il s'agit d'un système inductif.

3.3 Mesures en court-circuit

3.3.1 Positon maximale

♦ Schéma de la mesure

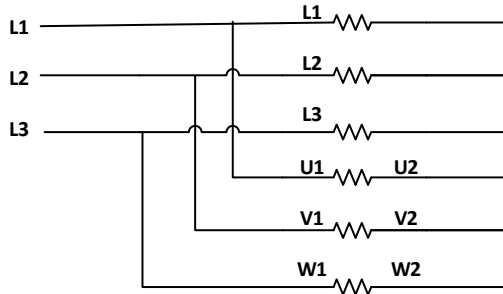


Figure 19 : Schéma de la mesure en court-circuit en position maximale

♦ Tableau des résultats

	Courant [A]				Tension [V]
	Reseau	Primaire	Sortie	Magnetisant	Reseau
Mesure	4,85	3,05	1,84	0,017	0,52
Calcul	5,69	3,56	2,13	0,004	0,52
Erreur [%]	17,32	16,67	16,02	76,00	0,00

Figure 20 : Tableau des résultats en court-circuit en position maximale

NB : Les tensions du tableau sont des tensions de phase (phase-neutre). Les valeurs sont des grandeurs efficaces. Pour la mesure, le courant magnétisant est calculé.

En appliquant la même tension d'alimentation, la gamme des différents courants correspond bien. Il y a une erreur maximale entre les courants (magnétisant non-compris) de 17%. Le courant magnétisant est très petit, cela explique une plus grosse erreur.

♦ Courbes des courants (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 1 (jaune) : Courant du réseau phase L2 ;
- Canal 2 (bleu) : Courant au primaire phase L2 ;
- Canal 3 (rouge) : Courant au secondaire phase L2.

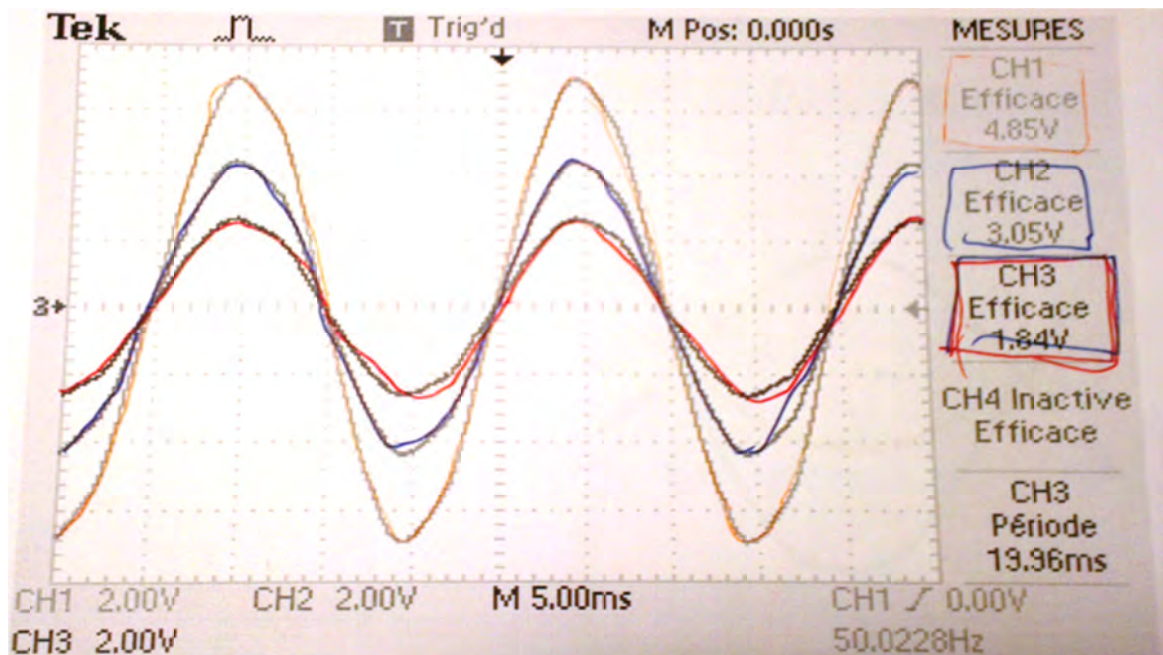


Figure 21 : Courbes mesurées des courants en court-circuit en position maximale

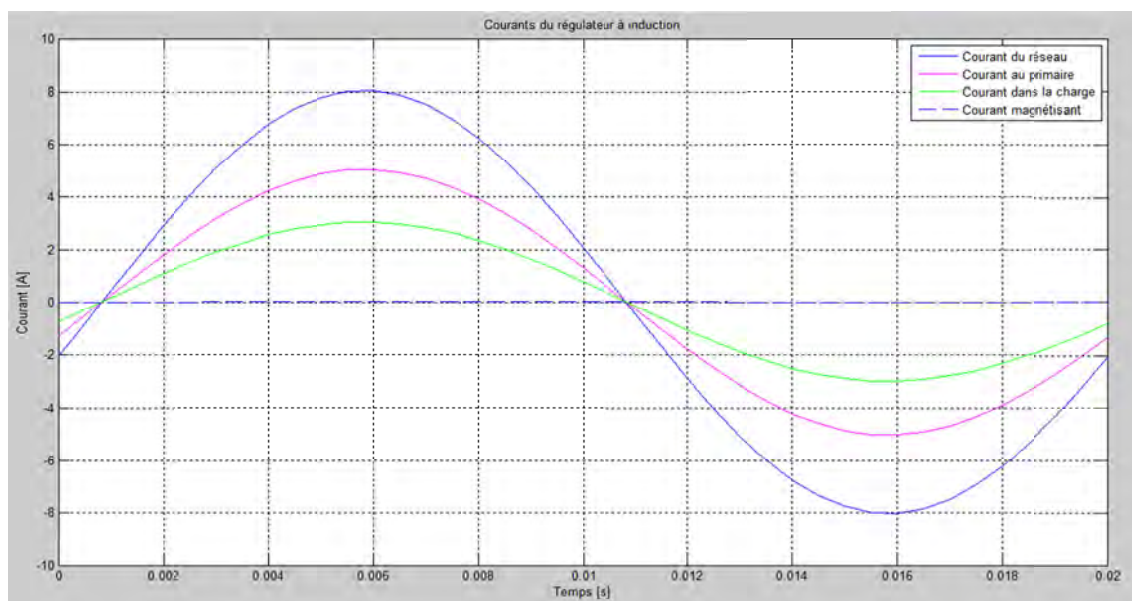


Figure 22 : Courbes calculées des courants en court-circuit en position maximale

Le calcul et la mesure donnent le même résultat. Tous les courants sont en phase.

Il est à noter qu'en rapportant le courant du secondaire à l'aide du rapport de transformation, il devient égal au courant du primaire car le courant magnétisant est très petit. Sur le schéma équivalent en position maximale, l'angle du rapport de transformation est 0° . Les courants sont donc en phase.

$$\overline{I'_2} = \overline{I_1} = \frac{\overline{I_2}}{\overline{u}} = \frac{1.84}{0.6} = 3.06 [A]$$

Le courant du réseau est la somme du courant au primaire et le courant dans la charge (secondaire).

3.3.2 Positon minimale

♦ Schéma de la mesure

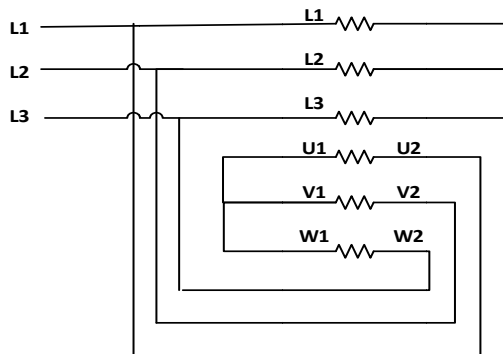


Figure 23 : Schéma de la mesure en court-circuit en position minimale

♦ Tableau des résultats

	Courant [A]				Tension [V]
	Reseau	Primaire	Sortie	Magnetisant	Reseau
Mesure	4,13	10,30	6,22	0,07	5,58
Calcul	3,83	9,55	5,72	0,02	5,58
Erreur [%]	7,28	7,28	7,99	71,80	0,00

Figure 24 : Tableau des résultats en court-circuit en position minimale

NB : Les tensions du tableau sont des tensions de phase (phase-neutre). Les valeurs sont des grandeurs efficaces. Pour la mesure, le courant magnétisant est calculé.

En appliquant la même tension d'alimentation, la gamme des différents courants correspond bien. Il y a une erreur maximale entre les courants (magnétisant non-compris) de 8%. De plus le courant magnétisant est très petit, cela explique une plus grosse erreur.

♦ Courbes des courants (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 1 (jaune) : Courant du réseau phase L2 ;
- Canal 2 (bleu) : Courant au primaire phase L2 ;
- Canal 3 (rouge) : Courant au secondaire phase L2.

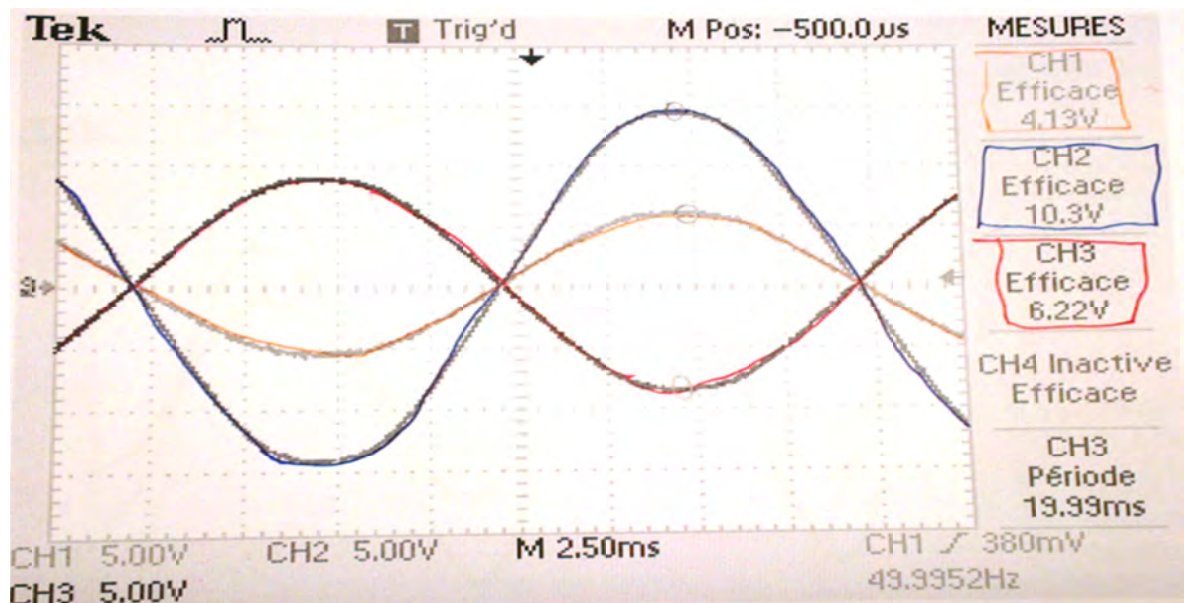


Figure 25 : Courbes mesurées des courants en court-circuit en position minimale

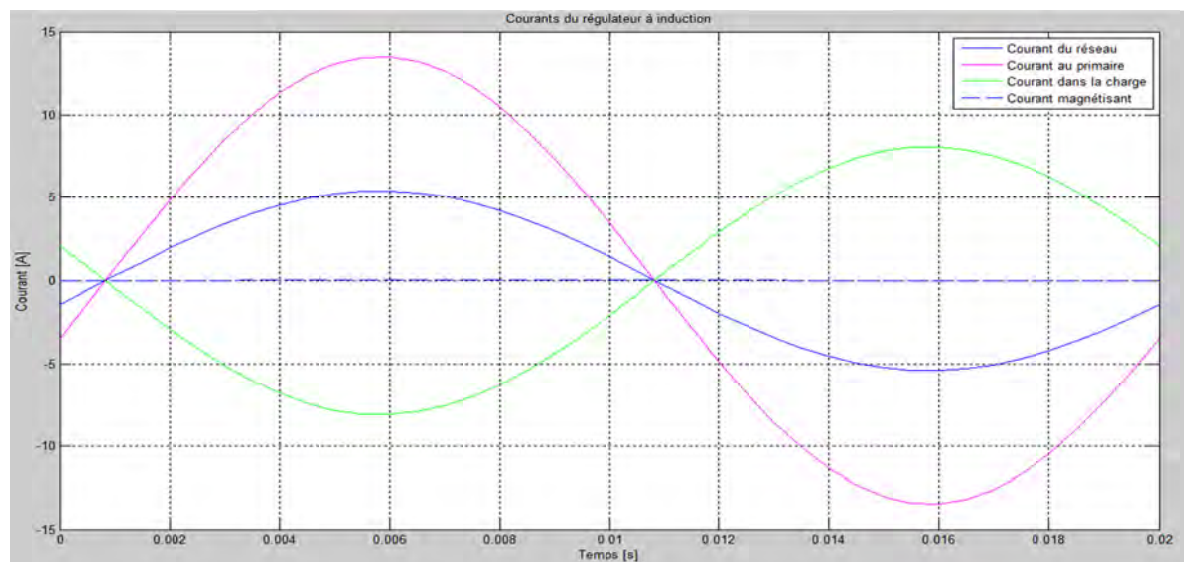


Figure 26 : Courbes calculées des courants en court-circuit en position minimale

Le calcul et la mesure donnent le même résultat.

Il est à noter qu'en rapportant le courant du secondaire à l'aide du rapport de transformation, il devient égal au courant du primaire car le courant magnétisant est très petit. Sur le schéma équivalent en position minimale, l'angle du rapport de transformation est 180° . Cela explique un déphasage de 180° entre le courant primaire et le courant dans la charge.

$$\overline{I_2} = \overline{I_1} = \frac{\overline{I_2}}{\frac{1}{u}} = \frac{6.22 \angle 180^\circ}{0.6 \angle 180^\circ} = 10.3 [A]$$

Le courant du réseau est la somme du courant au primaire et le courant dans la charge (secondaire). Il est important de constater que le courant du réseau est le 40% du courant au primaire et cela à cause du déphasage entre le courant au primaire et au secondaire.

3.4 Mesures sur charge ohmique

3.4.1 Positon maximale

♦ Schéma de la mesure

Une charge ohmique est branchée en étoile. Chaque résistance vaut 165 Ohms.

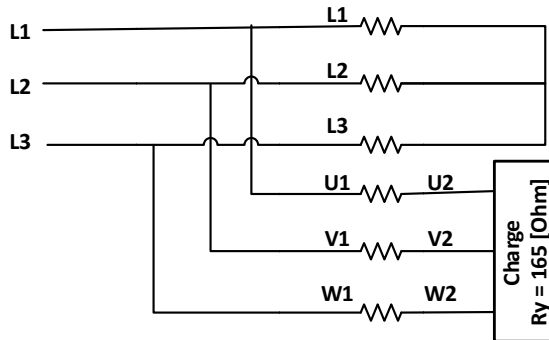


Figure 27 : Schéma de la mesure avec charge ohmique en position maximale

♦ Tableau des résultats

	Courant [A]				Tension [V]			Puissance [VA]				cos(phi) [-]			
	Res.	Prim.	Sortie	Magn.	Res.	Sortie	Ind.	Res.	Prim.	Sortie	Sec.	Res.	Prim.	Sortie	Sec.
Mesure	5,75	3,70	2,00	0,37	131	349	218	2280	1460	2170	800	1,00	0,99	1,00	1,00
Calcul	5,94	3,84	2,10	0,56	131	348	217	2336	1511	2201	828	0,99	0,99	1,00	1,00
Erreur [%]	3,30	3,78	5,00	51,36	0,00	0,32	0,50	2,46	3,49	1,43	3,50	1,00	0,25	0,00	0,00

Figure 28 : Tableau des résultats avec charge ohmique en position maximale

NB : Les tensions du tableau sont des tensions de phase (phase-neutre). Les valeurs sont des grandeurs efficaces. Pour la mesure, le courant magnétisant et la tension induite sont calculés.

Le calcul et la mesure correspondent bien. L'erreur est très petite 5% au maximum (sauf courant magnétisant). Il y a une différence de 190 [mA] sur le courant magnétisant, cela est acceptable.

♦ Courbes des courants (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 1 (jaune) : Courant du réseau, phase L2 ;
- Canal 2 (bleu) : Courant au primaire, phase L2 ;
- Canal 3 (violet) : Courant dans la charge, phase L2.

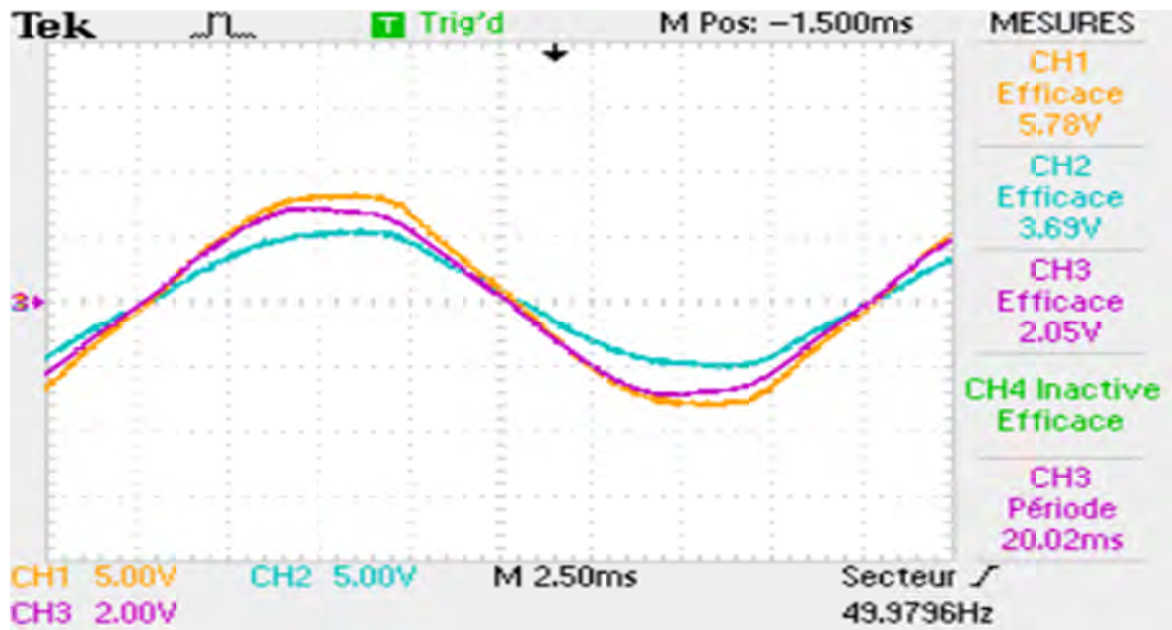


Figure 29 : Courbes mesurées des courants avec charge ohmique en position maximale

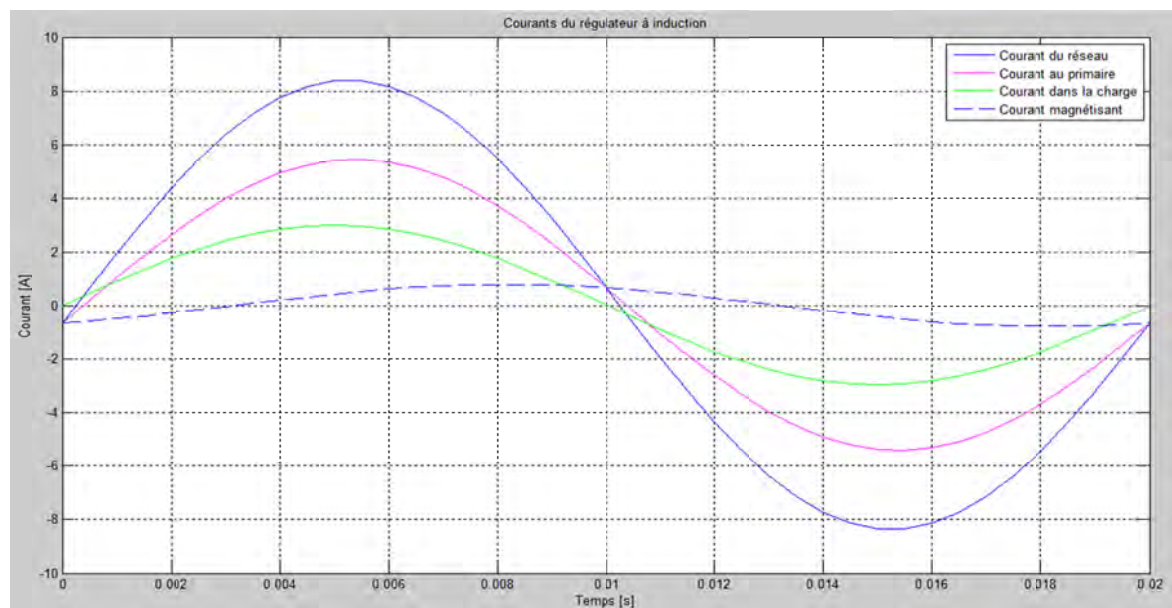


Figure 30 : Courbes calculées des courants avec charge ohmique en position maximale

Entre les mesures et les calculs, l'amplitude et l'angle des courants correspondent bien. Le courant magnétisant n'est pas mesurable.

♦ Courbes des tensions (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 2 (bleu) : Tension du réseau L2-N ;
- Canal 4 (vert) : Tension de sortie V2-N.

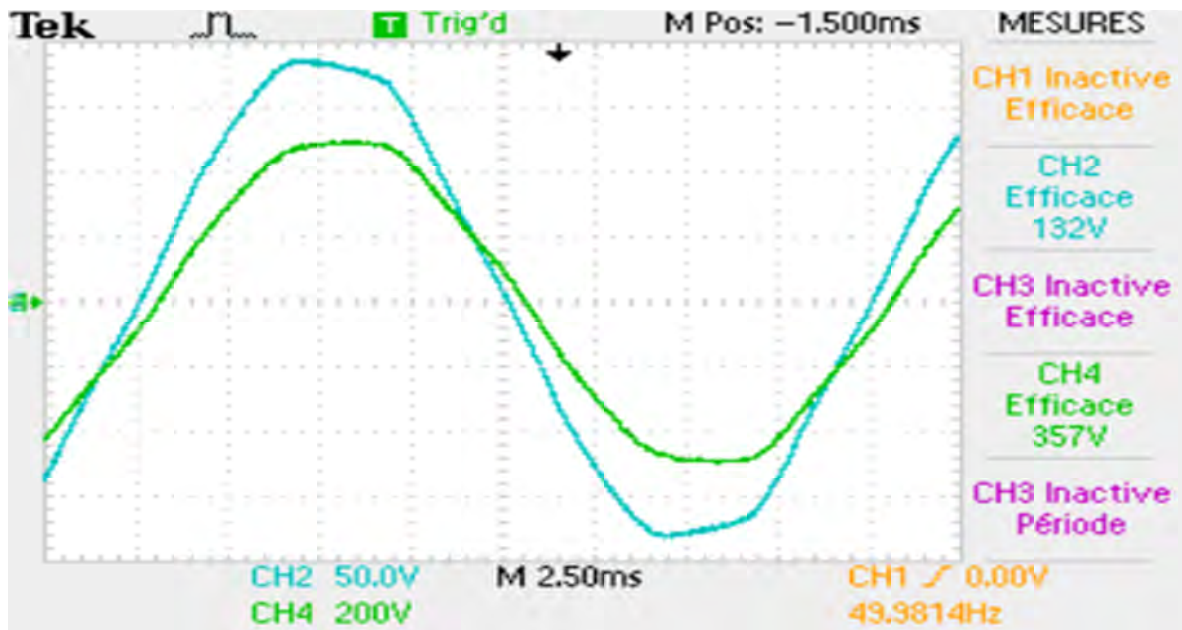


Figure 31 : Courbes mesurées des tensions avec charge ohmique en position maximale

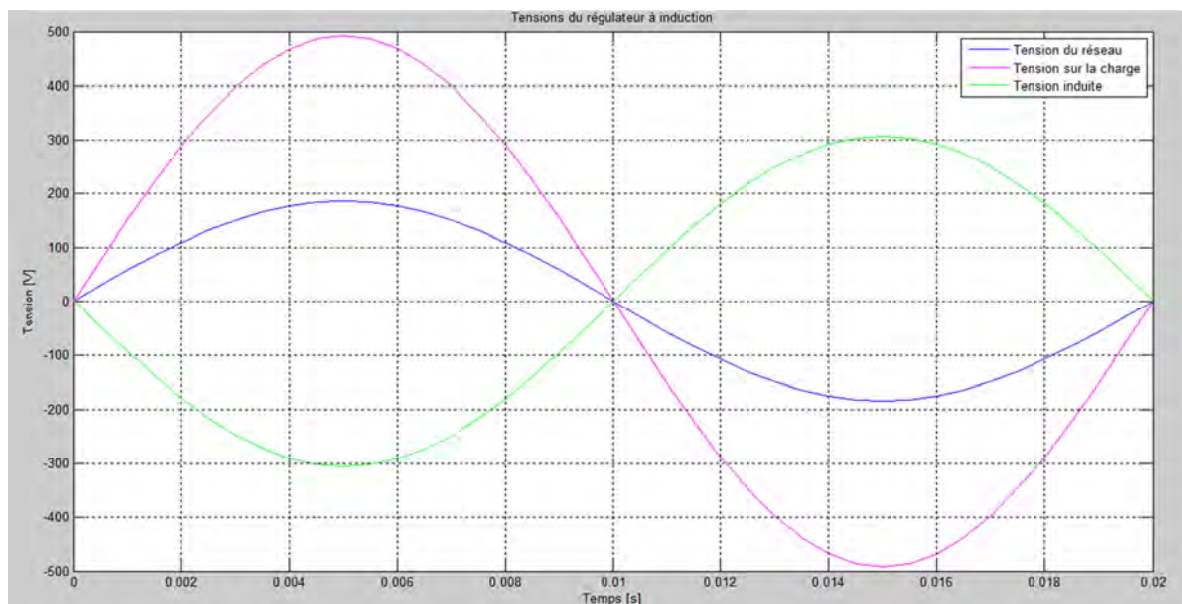


Figure 32 : Courbes calculées des tensions avec charge ohmique en position maximale

L'amplitude et l'angle des tensions correspondent entre les mesures et les calculs.

La tension induite n'a pas été mesurée. En position maximale elle est toujours en opposition de phase avec la tension du réseau (visible à la Figure 13).

3.4.2 Positon minimale

♦ Schéma de la mesure

Une charge ohmique est branchée en étoile. Chaque résistance vaut 40 Ohms.

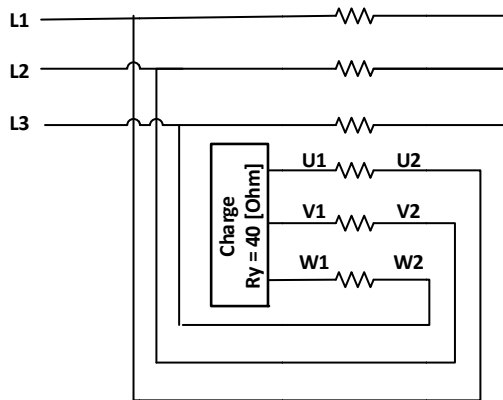


Figure 33 : Schéma de la mesure avec charge ohmique en position minimale

♦ Tableau des résultats

	Courant [A]				Tension [V]			Puissance [VA]				cos(phi) [-]			
	Res.	Prim.	Sortie	Magn.	Res.	Sortie	Ind.	Res.	Prim.	Sortie	Sec.	Res.	Prim.	Sortie	Sec.
Mesure	1,60	3,60	2,00	0,27	131	-86	217	630	1441	520	770	0,96	0,99	1,00	-1,00
Calcul	1,79	3,91	2,14	0,55	131	-86	217	706	1537	553	843	0,97	0,99	1,00	-1,00
Erreur [%]	11,88	8,64	7,00	106,25	0,00	-0,58	0,23	12,06	6,66	6,35	9,48	0,52	0,00	0,00	0,00

Figure 34 : Tableau des résultats avec charge ohmique en position minimale

NB : Les tensions du tableau sont des tensions de phase (phase-neutre). Les valeurs sont des grandeurs efficaces. Pour la mesure, le courant magnétisant et la tension induite sont calculés.

Les calculs et les mesures correspondent bien. L'erreur est de 12% au maximum (sauf courant magnétisant). Le courant magnétisant est deux fois plus important dans le calcul, cependant il reste faible par rapport au courant du primaire.

♦ Courbes des courants (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 1 (jaune) : Courant du réseau, phase L2 ;
- Canal 2 (bleu) : Courant au primaire, phase L2 ;
- Canal 3 (violet) : Courant dans la charge, phase L2 ;
- Canal 4 (vert) : Courant dans la charge, phase L2.

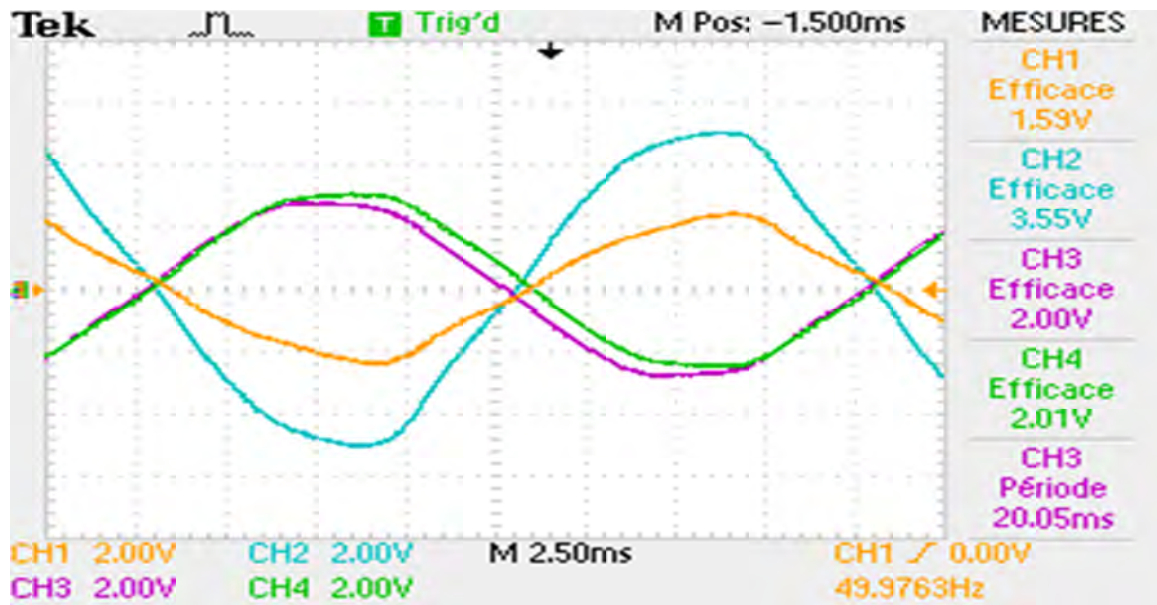


Figure 35 : Courbes mesurées des courants avec charge ohmique en position minimale

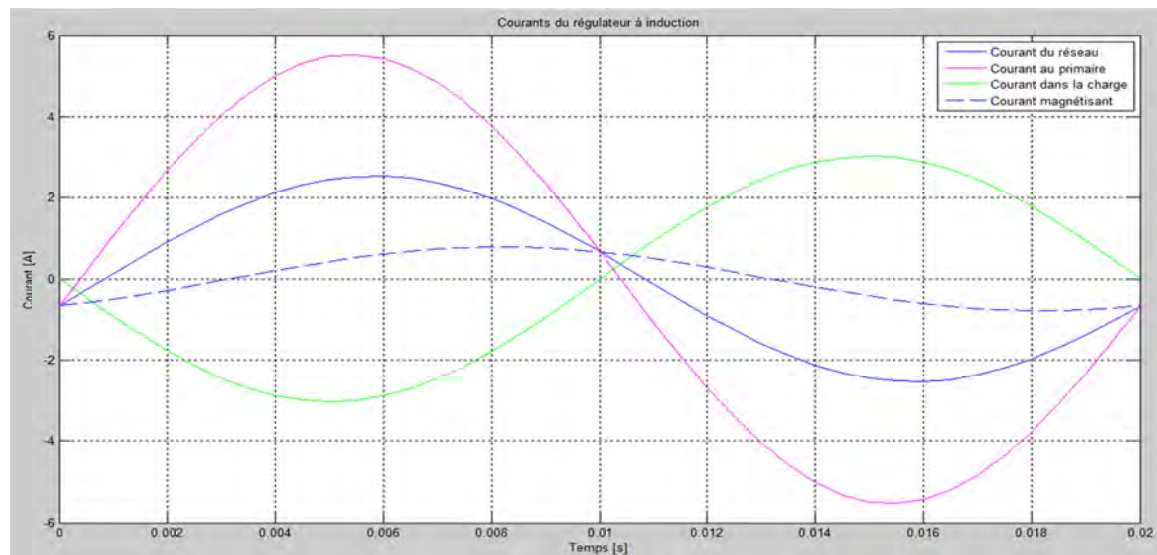


Figure 36 : Courbes calculées des courants avec charge ohmique en position minimale

Entre les mesures et les calculs, l'amplitude et l'angle des courants correspondent bien. Le courant magnétisant n'est pas mesurable.

♦ Courbes des tensions (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 2 (bleu) : Tension du réseau L2-N ;
- Canal 4 (vert) : Tension de sortie V1-N.

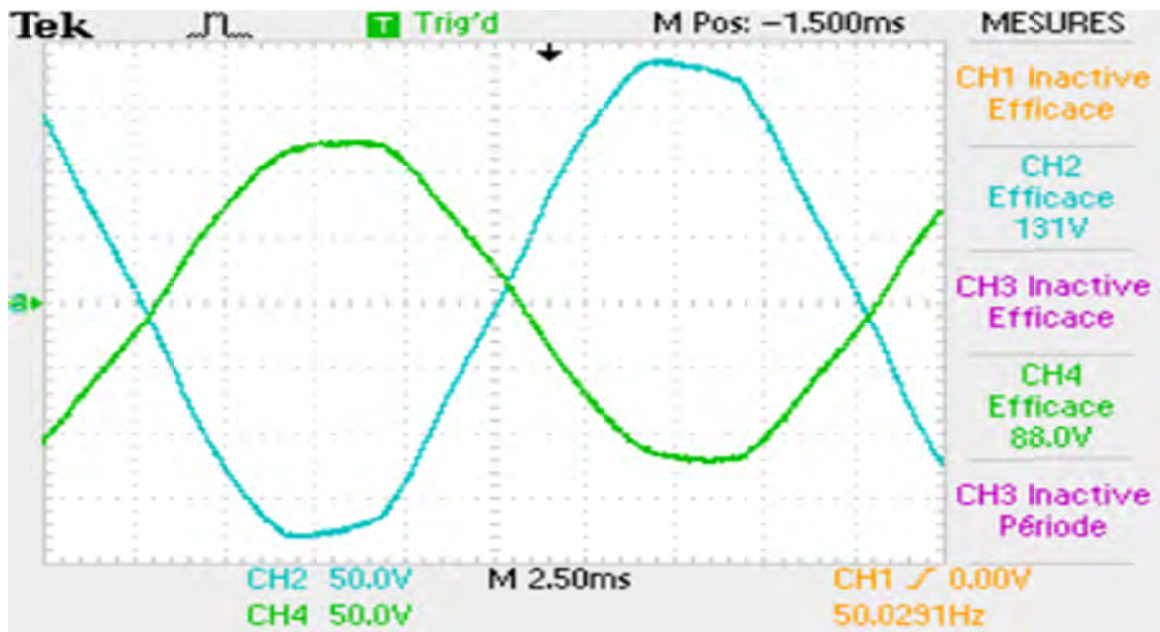


Figure 37 : Courbes mesurées des tensions avec charge ohmique en position minimale

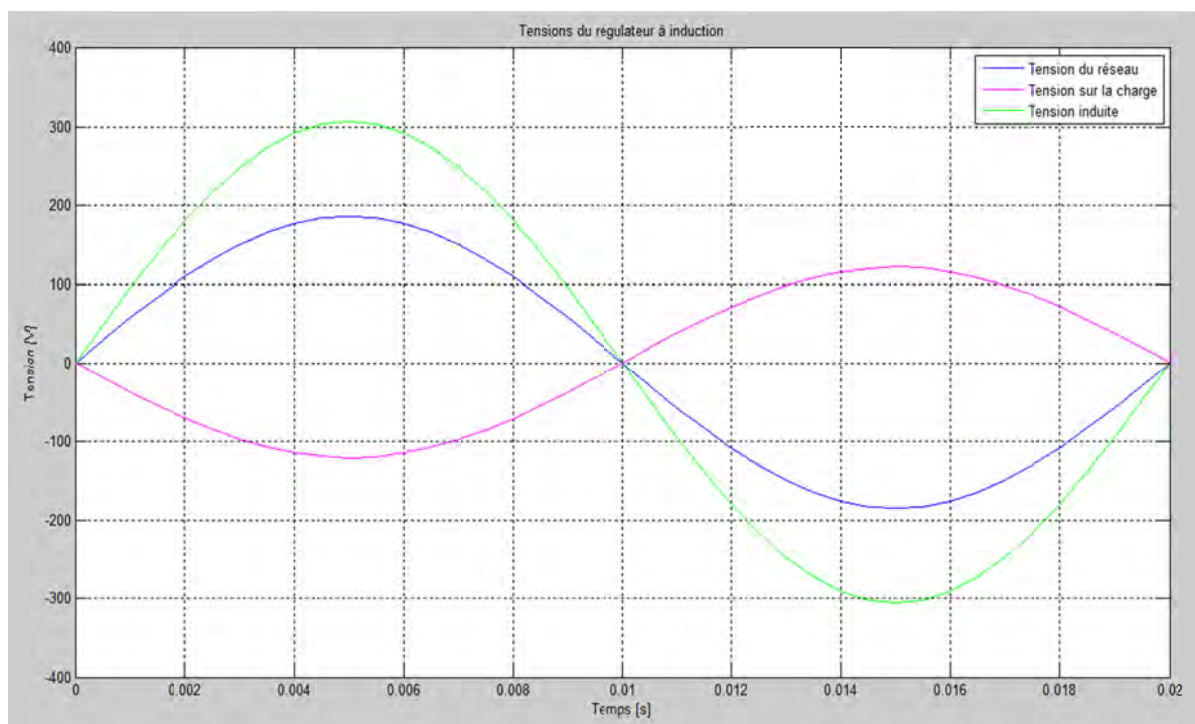


Figure 38 : Courbes calculées des tensions avec charge ohmique en position minimale

L'amplitude et l'angle des tensions correspondent entre la mesure et le calcul.

La tension induite n'a pas été mesurée. En position minimale elle est toujours en phase avec la tension du réseau (visible à la Figure 17).

3.5 Mesures sur charge inductive

3.5.1 Positon maximum

♦ Schéma de la mesure

Une charge inductive est branchée en étoile. Chaque bobine vaut 625 [mH].

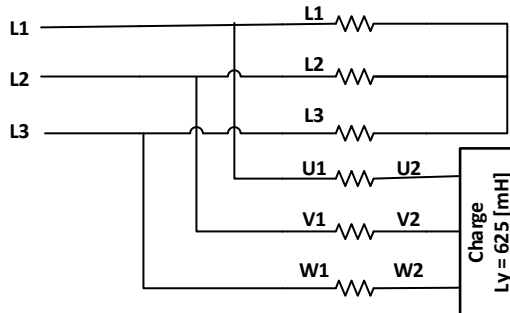


Figure 39 : Schéma de la mesure avec charge inductive en position maximale

♦ Tableau des résultats

	Courant [A]				Tension [V]			Puissance [VA]				cos(phi) [-]			
	Res.	Prim.	Sortie	Magn.	Res.	Sortie	Ind.	Res.	Prim.	Sortie	Sec.	Res.	Prim.	Sortie	Sec.
Mesure	5,40	3,50	1,80	0,50	133	353	221	2100	1390	1991	720	0,10	0,11	0,07	0,07
Calcul	5,28	3,48	1,80	0,56	133	353	220	2099	1386	1906	715	0,06	0,09	0,00	0,00
Erreur [%]	2,22	0,57	0,00	12,00	0,00	0,00	0,06	0,05	0,29	4,27	0,69				

Figure 40 : Tableau des résultats avec charge inductive en position maximale

NB : Les tensions du tableau sont des tensions de phase (phase-neutre). Les valeurs sont des grandeurs efficaces. Pour la mesure, le courant magnétisant et la tension induite sont calculés.

Les calculs et les mesures correspondent bien. L'erreur est de 4% au maximum (sauf courant magnétisant). Il y a une différence de 6[mA] sur le courant magnétisant, cela est acceptable.

Les cos(phi) entre les mesures et les calculs présentent une légère différence car la résistance du cuivre n'a pas été pris en compte dans le calcul. Mais l'ordre de grandeur correspond bien.

♦ Courbes des courants (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 1 (jaune) : Courant du réseau, phase L2 ;
- Canal 2 (bleu) : Courant au primaire, phase L2 ;
- Canal 3 (violet) : Courant dans la charge, phase L2.

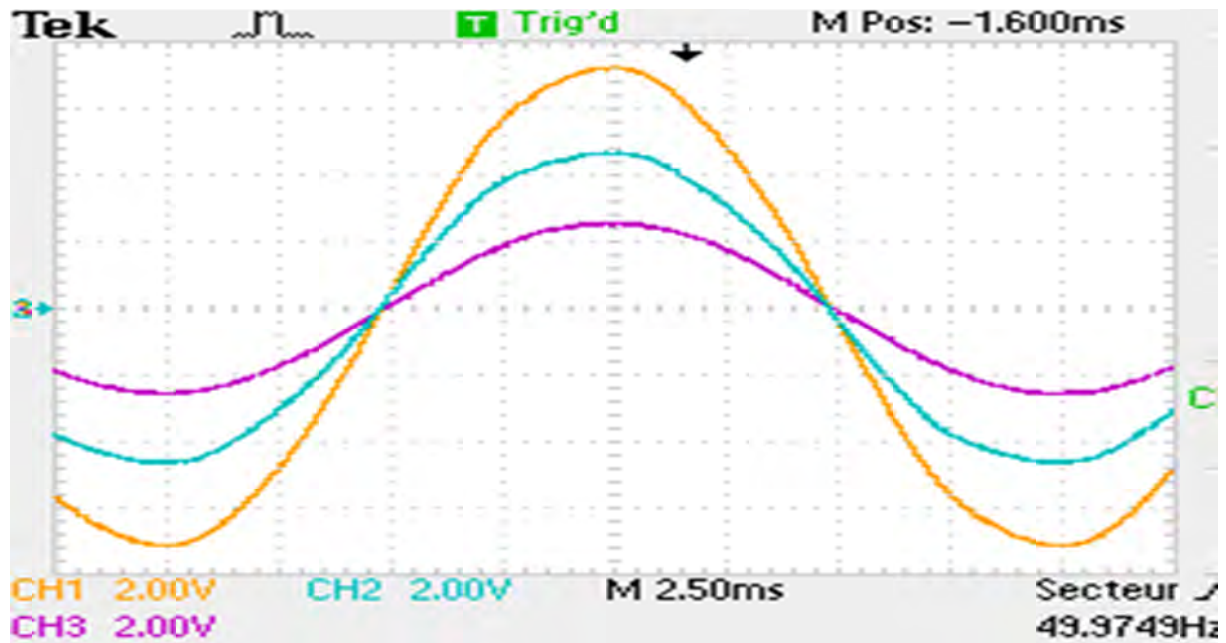


Figure 41 : Courbes mesurées des courants avec charge inductive en position maximale

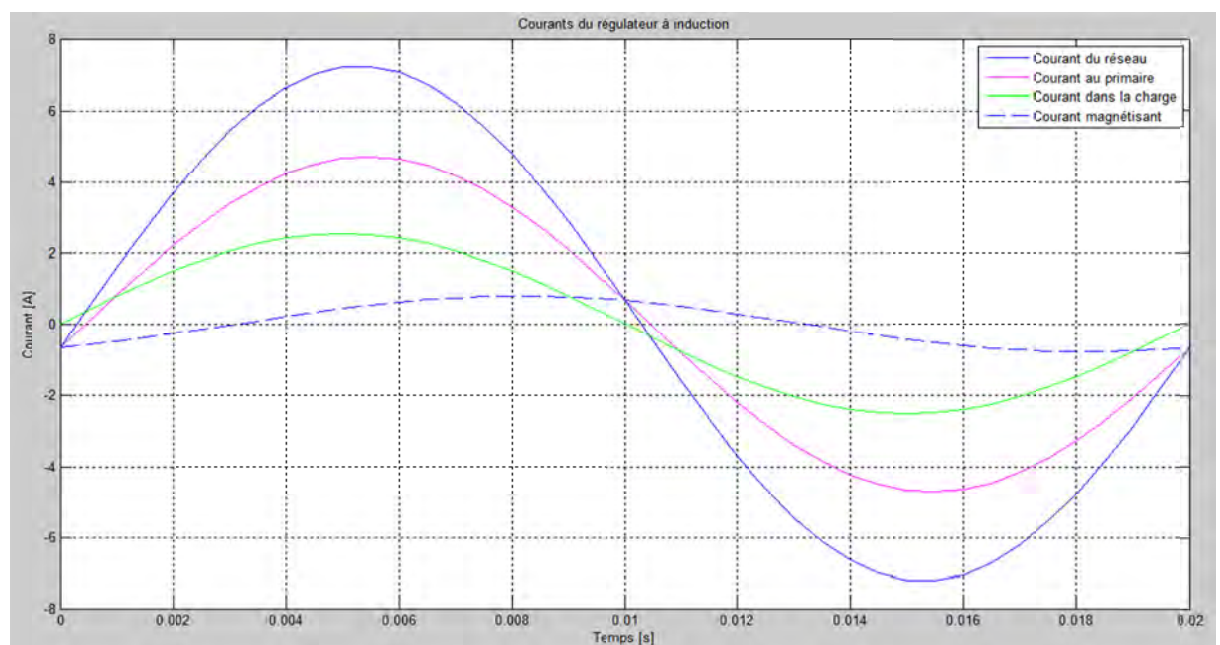


Figure 42 : Courbes calculées des courants avec charge inductive en position maximale

Entre les mesures et les calculs, l'amplitude et l'angle des courants correspondent bien. Le courant magnétisant n'est pas mesurable.

◆ Courbes des tensions (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 2 (bleu) : Tension du réseau L1-L2 ;
- Canal 4 (vert) : Tension de sortie U1-V1.

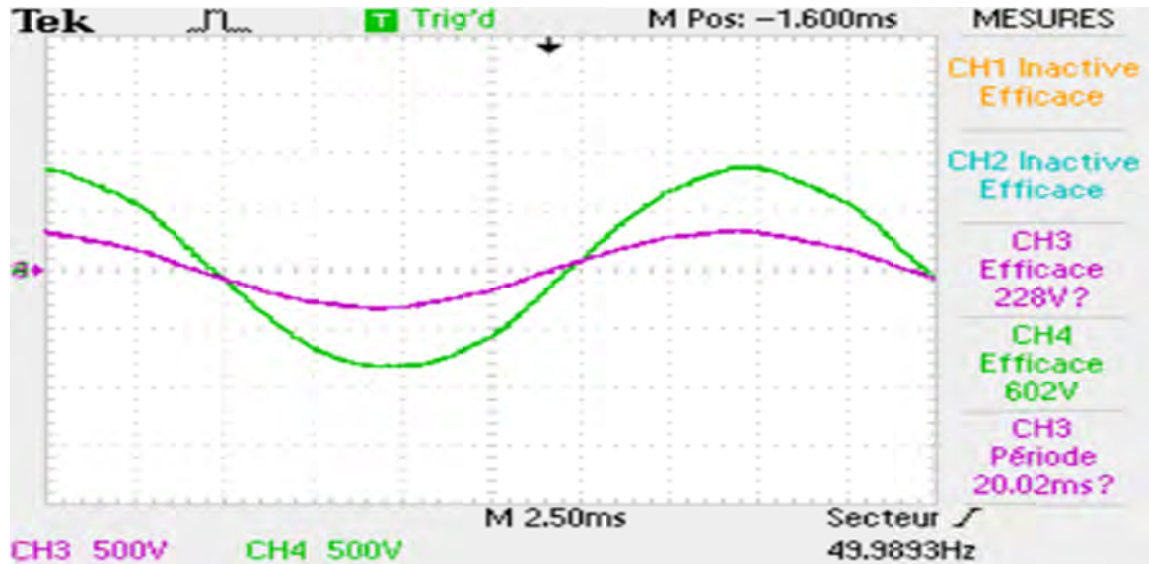


Figure 43 : Courbes mesurées des tensions avec charge inductive en position maximale

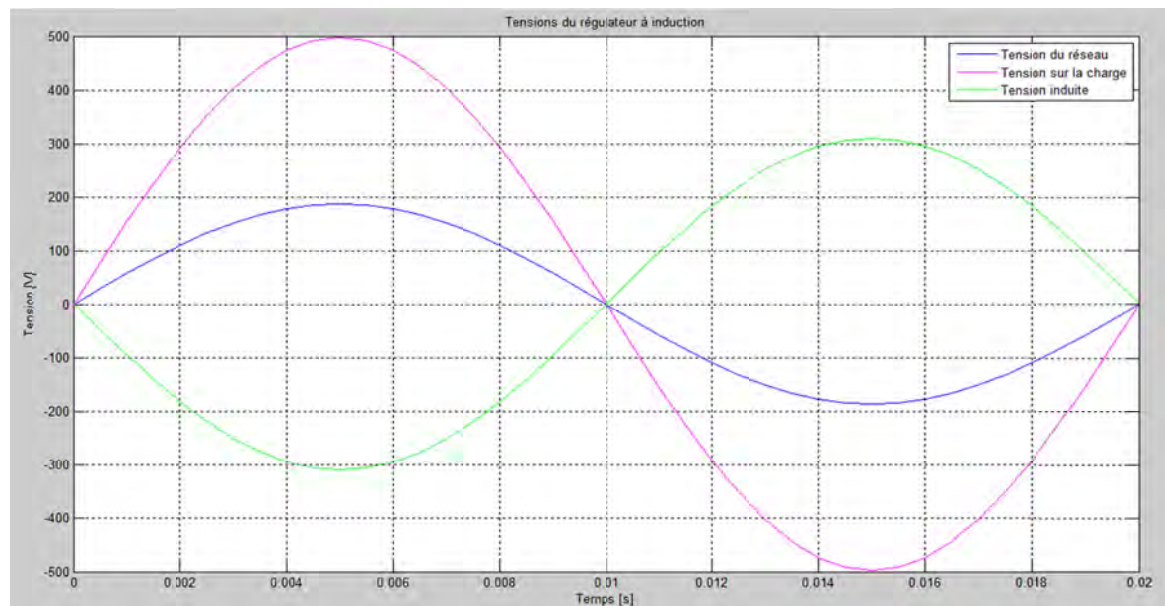


Figure 44 : Courbes calculées des tensions avec charge inductive en position maximale

La mesure a été faite sur une tension de ligne et le calcul est fait par rapport à une tension de phase.

L'angle des tensions correspond entre la mesure et le calcul. Les amplitudes correspondent en divisant par un rapport $\sqrt{3}$.

La tension induite n'a pas été mesurée. En position maximale elle est toujours en opposition de phase avec la tension du réseau (visible à la Figure 13).

3.5.2 Positon minimale

♦ Schéma de la mesure

Une charge inductive est branchée en étoile. Chaque bobine vaut 145 [mH].

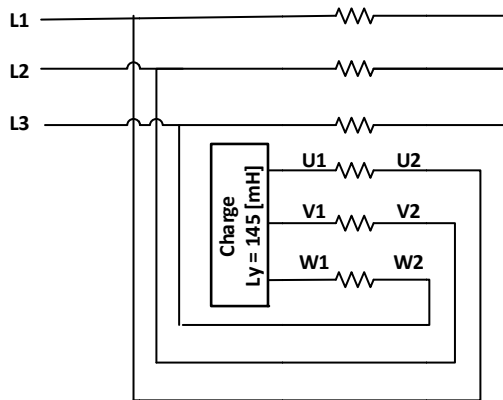


Figure 45 : Schéma de la mesure avec charge inductive en position minimale

♦ Tableau des résultats

	Courant [A]				Tension [V]			Puissance [VA]				cos(phi) [-]			
	Res.	Prim.	Sortie	Magn.	Res.	Sortie	Ind.	Res.	Prim.	Sortie	Sec.	Res.	Prim.	Sortie	Sec.
Mesure	1,80	3,70	1,90	0,53	134	-89	223	710	1460	500	760	0,25	0,15	-0,09	0,09
Calcul	1,81	3,75	1,95	0,57	134	-89	223	727	1563	521	785	0,18	0,10	-0,01	0,00
Erreur [%]	0,48	1,27	2,73	6,87	0,00	-0,10	0,04	2,41	7,05	4,13	3,24				

Figure 46 : Tableau des résultats avec charge inductive en position minimale

NB : Les tensions du tableau sont des tensions de phase (phase-neutre). Les valeurs sont des grandeurs efficaces. Pour la mesure, le courant magnétisant et la tension induite sont calculés.

Le calcul et la mesure correspondent bien. L'erreur est de 7% au maximum.

Les cos(phi) entre les mesures et les calculs présentent une légère différence car la résistance du cuivre n'a pas été pris en compte dans le calcul. Mais l'ordre de grandeur entre mesures et calculs correspond bien.

◆ Courbes des courants (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 1 (jaune) : Courant du réseau, phase L2 ;
- Canal 2 (bleu) : Courant au primaire phase L2 ;
- Canal 3 (violet) : Courant dans la charge, phase L2.

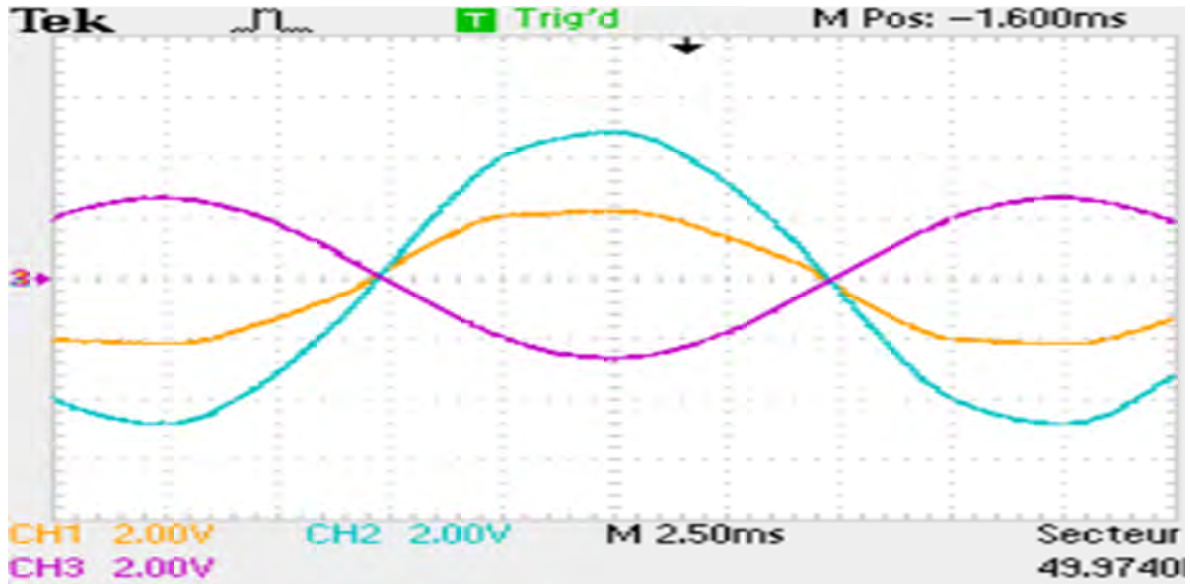


Figure 47 : Courbes mesurées des courants avec charge inductive en position minimale

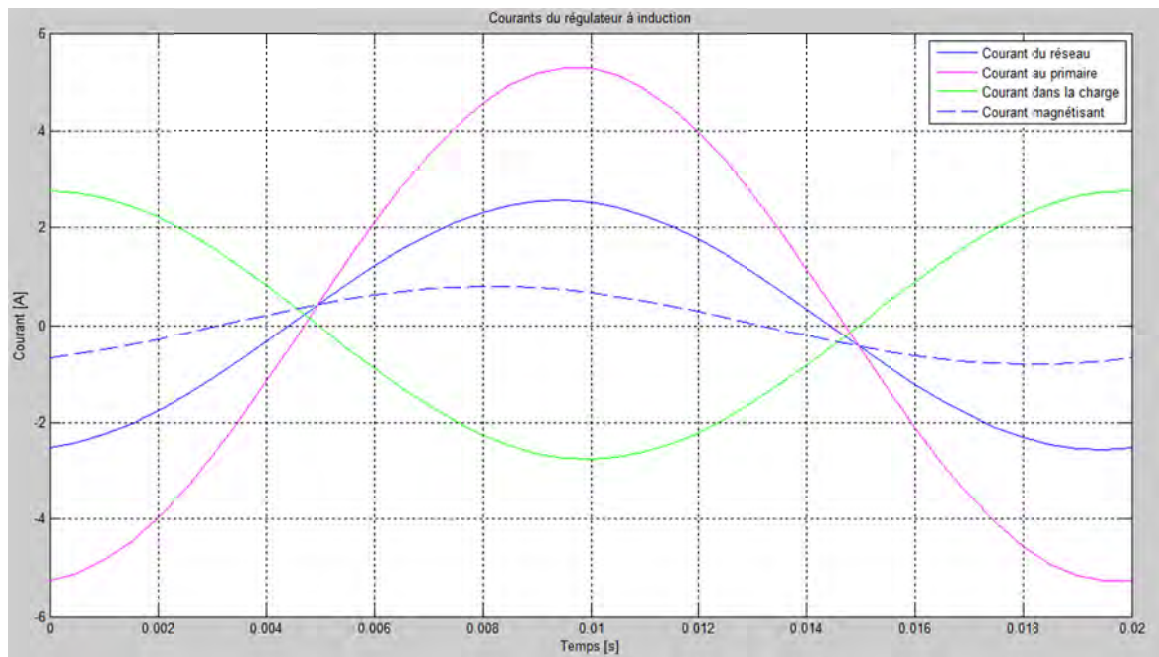


Figure 48 : Courbes calculées des courants avec charge inductive en position minimale

Entre les mesures et les calculs, l'amplitude et l'angle des courants correspondent bien. Le courant magnétisant n'est pas mesurable.

◆ Courbes des tensions (mesures et calculs)

Les canaux de l'oscilloscope sont définis comme suit :

- Canal 2 (bleu) : Tension du réseau L1-L2 ;
- Canal 4 (vert) : Tension de sortie U1-V1.

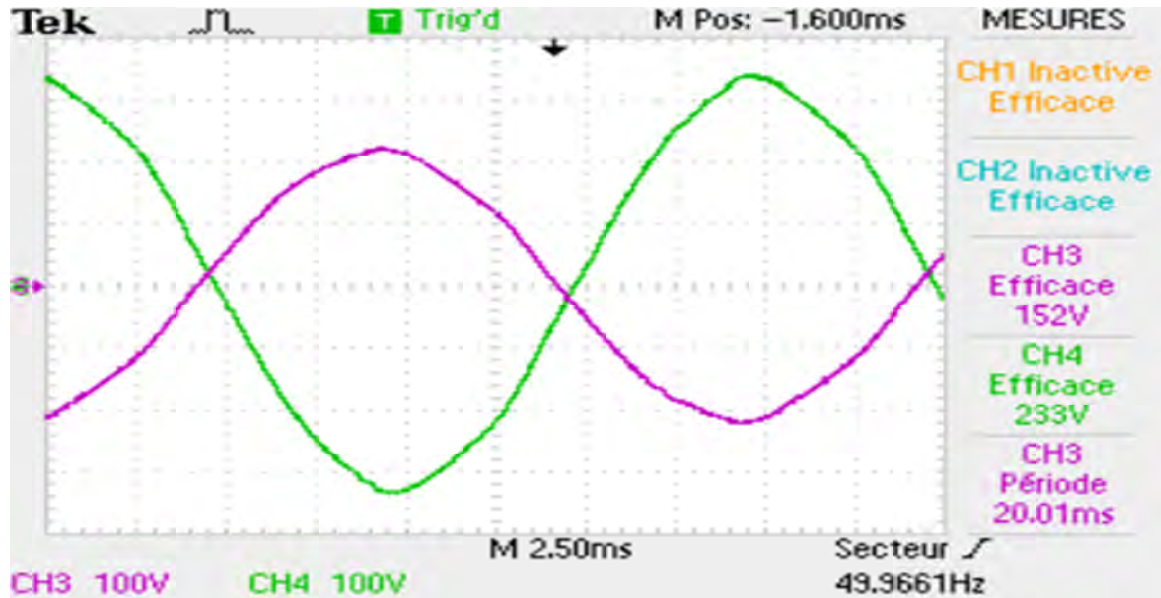


Figure 49 : Courbes mesurées des tensions avec charge inductive en position minimale

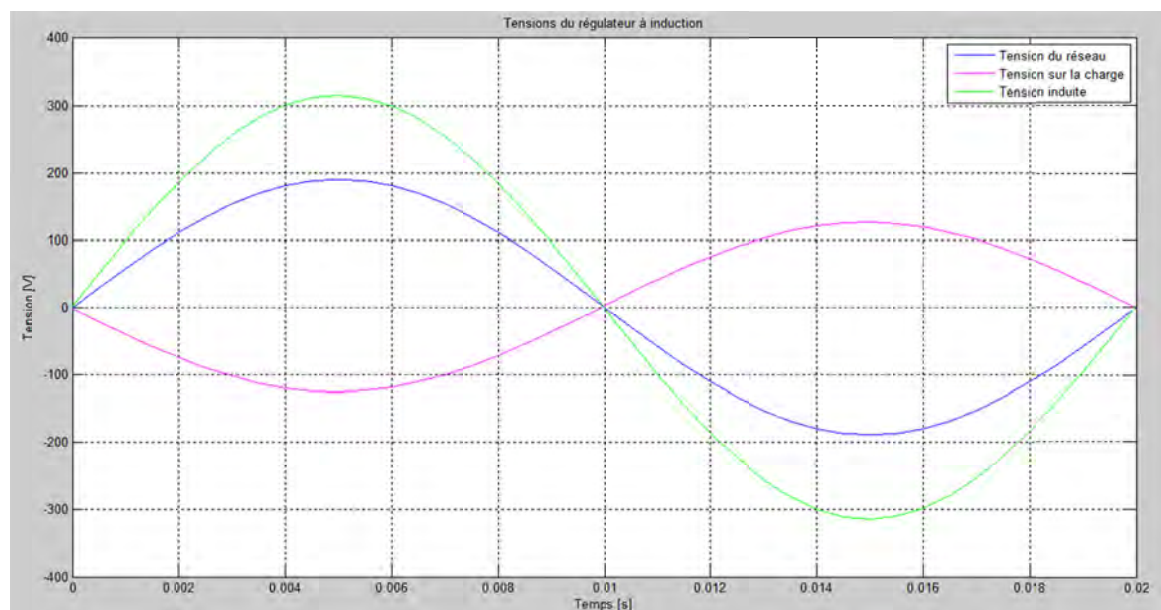


Figure 50 : Courbes calculées des tensions avec charge inductive en position minimale

La mesure a été faite sur une tension de ligne et le calcul est fait par rapport à une tension de phase.

L'angle des tensions correspondent. Les amplitudes correspondent en divisant par un rapport $\sqrt{3}$.

La tension induite n'a pas été mesurée. En position minimale elle est toujours en phase avec la tension du réseau (visible à la Figure 17).

4 DISCUSSION DES RESULTATS

La totalité des valeurs calculées correspond aux mesures. Les graphiques du script de calcul donnent le même résultat que les mesures à l'oscilloscope.

Il y a une différence sur les valeurs entre 5% et 15% en fonction du cas. Le courant magnétisant est quant à lui plus élevé dans les calculs que dans les mesures mais cela n'est pas dérangeant étant donné qu'il est très petit par rapport au courant du primaire (transformateur chargé).

Ces essais permettent la validation du schéma équivalent proposé. Il pourra être appliqué au régulateur à induction.

SION, LE 11 MAI 2013

FARNER LUCAS :

5 SCRIPT DE CALCUL MATLAB

```
clear all
clc

%% Schéma équivalent
disp('Valeur des composants du schéma équivalent');
disp('=====');
disp(' ');

Xs=30e-3*j
Xrprim=30e-3*j
Rs=0.119
Rrprim=.107
u=0.6
Rfe=431
Xh=280*j

%% Entrer les paramètres
disp(' ');
disp('Entrer la valeur de la charge');
disp('=====');
disp(' ');
Zload=input('Zload = ');

disp(' ');
disp('Entrer la tension de phase RMS ');
disp('=====');
disp(' ');
U1=input('U1 = ');

disp(' ');
disp('Entrer l angle de déphasage de la tension induite(Rappel: Umin=0[°]
Umax=180[°])');
```

```

disp('=====');
disp(' ');
phi=input('phi = ');

%% Calcul intermédiaire
u_complexe=(u*cos(phi*pi/180)+j*u*sin(phi*pi/180));
Z1=Xs+Rs;
Z2=Xrprim+Rrprim;
Z3=(Rfe*Xh)/(Rfe+Xh);

%% Calcul des courant et tension INPUT/OUTPUT

%Partie 1 source en cc coté charge
Zequ_1=Z1+1/(1/(Z3)+1/(Z2+Zload*u^2));

I1_1=U1/Zequ_1;
Im_1=I1_1*(Z2+Zload*u^2)/(Z3+(Z2+Zload*u^2));
I2prim_1=-I1_1*(Z3)/(Z3+(Z2+Zload*u^2));
U2prim_1=-I2prim_1*(Zload*u^2);

U2_1=U2prim_1/u_complexe;
I2_1=-U2_1/Zload

%Partie 2 source en cc coté réseau

Zequ_2=(Z2/(u^2))+Zload+1/(1/(Z1/(u^2))+1/(Z3/(u^2)));
I2_2=U1/Zequ_2;
U2_2=U1-Zload*I2_2;

U2prim_2=U2_2*u_complexe;
I2prim_2=U2prim_2/(Z2+(1/(1/Z3+1/Z1)));

Im_2=I2prim_2*Z1/(Z1+Z3);
I1_2=-I2prim_2*Z3/(Z1+Z3);

Im_2a=(I2_2*((Z1/(u^2))/(Z3/(u^2)+Z1/(u^2))))/u_complexe;
I1_2a=-(I2_2*((Z3/(u^2))/(Z3/(u^2)+Z1/(u^2))))/u_complexe;
I2_2a=Im_2a-I1_2a;

%Addition

I1=I1_2+I1_1;
Im=Im_2+Im_1;
I2=I2_2+I2_1;
U2=U2_2+U2_1;

Iload=I2;
Uload=U1-U2;
Ireseau=I1+I2;

%% Calcul des puissances
Sin = 3*U1*conj(Ireseau);
Sout = 3*Uload*conj(Iload);
Sstator = 3*U1*conj(I1);
Srotorreseau = 3*U1*conj(Iload);

%% Affichage des perte cuivre et du temps d'essai
Ccu=380;

```

```

mstator=35;
mrotor=25;
Pcus=3*Rs*abs(I1)^2;
Pcur=3*Rrprim/(abs(u)^2)*abs(Iload)^2;
ts=mstator*Ccu*130/Pcus*1/3600;
tr=mrotor*Ccu*130/Pcur*1/3600;

disp(' ');
disp('Perte cuivre toale');
disp('=====');
disp(' ');
disp('Perte cuivre au stator : ');
disp(Pcus)
disp('Perte cuivre au rotor : ');
disp(Pcur)

disp(' ');
disp('Temps essai en heures et secondes pour échauffement adiabatique');
disp('=====');
disp(' ');
disp('Stator : ');
disp(ts)
disp(ts*3600)
disp('Rotor: ');
disp(tr)
disp(tr*3600)

%% Clacul du couple

Ma=(real(Sout)-real(Srotorreseau))/(2*25*pi);
Mb=(real(Srotorreseau)-real(Sout))/(2*25*pi);
Mc=(real(Srotorreseau))/(2*25*pi);

disp(' ');
disp('Couple de la machine en Nm');
disp('=====');
disp(' ');
disp(Ma);
disp(Mb);
disp(Mc);

%% Affichage des valeurs
%Affichage des tensions
disp(' ');
disp('Valeur RMS des courants et tensions');
disp('=====');
disp(' ');
disp('Tension du réseau: ');
disp(abs(U1))
%disp(angle(U1)*180/pi)
disp('Tension induite: ');
disp(abs(U2))
%disp(angle(Uinduite)*180/pi)
disp('Tension dans la charge: ');
disp(abs(Uload))
%disp(angle(Uload)*180/pi)
disp(' ');
disp(' ');

%Affichage des courants

```

```

disp('Courant du réseau: ');
disp(abs(Ireseau))
%disp(angle(Ireseau)*180/pi)
disp('Courant dans la charge: ');
disp(abs(Iload))
%disp(angle(Iload)*180/pi)
disp('Courant au primaire: ');
disp(abs(I1))
%disp(angle(I1)*180/pi)
disp('Courant magnétisant: ');
disp(abs(Im))
%disp(angle(Im)*180/pi)
disp(' ');
disp(' ');

%Affichage des puissances
disp('Puissances et cos(phi) au réseau: ');
disp(abs(Sin))
disp((Sin))
disp(cos(angle(Sin)))
disp('Puissance et cos(phi) en sortie : ');
disp(abs(Sout))
disp((Sout))
disp(cos(angle(Sout)))
disp('Puissance et cos(phi) au primaire: ');
disp(abs(Sstator))
disp(Sstator)
disp(cos(angle(Sstator)))
disp('Puissance et cos(phi) au secondaire (coté tension réseau): ');
disp(abs(Srotorreseau))
disp(Srotorreseau)
disp(cos(angle(Srotorreseau)))

%% Affichage des graphiques des tensions
tfinal=20e-3;
tpas = 0.25e-3;
f=50;
t = (0:tpas:tfinal);
figure('Name','Tensions du régulateur à induction','NumberTitle','off')
plot(t,sqrt(2)*abs(U1)*sin(2*pi*f*t+angle(U1)),'b',t,sqrt(2)*abs(Uload)*sin(2*pi*f*t+angle(Uload)),'m',t,sqrt(2)*abs(U2)*sin(2*pi*f*t+angle(U2)),'g');
grid on
legend('Tension du réseau','Tension sur la charge','Tension induite')
title('Tensions du régulateur à induction');
xlabel('Temps [s]');
ylabel('Tension [V]');

%% Affichage des graphiques des courants
tfinal=20e-3;
tpas = 0.25e-3;
f=50;
t = (0:tpas:tfinal);
figure('Name','Courants du régulateur à induction','NumberTitle','off')
plot(t,sqrt(2)*abs(Ireseau)*sin(2*pi*f*t+angle(Ireseau)),'b',t,sqrt(2)*abs(I1)*sin(2*pi*f*t+angle(I1)),'m',t,sqrt(2)*abs(Iload)*sin(2*pi*f*t+angle(Iload)),'g');
grid on
legend('Courant du réseau','Courant au primaire','Courant dans la charge')
title('Courants du régulateur à induction');
xlabel('Temps [s]');
ylabel('Courant [A]');

```

Annexe 3

**Script de calcul Matlab des composants du
schéma équivalent**

Script de calcul Matlab des composants du schéma équivalent

```

clear all
clc

%% Dimension machine et valeur universel

f=50; %fréquence du réseau
u0=4*pi*10^(-7); % Constante magnétique
m=3; % nombre de phase
Ds=0.383; % diamètre du stator
Dr=0.3804; % diamètre du rotor
d=1.3e-3; %entrefer
ls=0.17; % longueur active au stator
lr=0.162; % longueur active au rotor
bls=3e-3; %Largeur de l'ouverture de l'encoche au stator
blr=3.1e-3; %Largeur de l'ouverture de l'encoche au rotot
p=2; % Nombre de paires de pôles
Qs=72; % Nombre d'encoches au stator
Qr=60; % Nombre d'encoches au rotor
qs=6; % Nombre d'encoches par pôle et par phase u stator
qr=5; % Nombre d'encoches par pôle et par phase u stator
Tps=Ds*pi/4; %Pas polaire au stator
Tpr=Dr*pi/4; % Pas polaire au rotor
Tus=Ds*pi/Qs; % Pas d'encoche au stator
Tur=Dr*pi/Qr; % Pas d'encoche au stator

%% Nombre de spires et rapport de transformation
disp(' ');
disp('Entrer le nombre de spires au stator');
disp('=====');
disp(' ');
Ns=input('Ns = ');

disp(' ');
disp('Entrer le nombre de spires au rotor');
disp('=====');
disp(' ');
Nr=input('Nr = ');

disp(' ');
disp('Entrer le facteur de bobinage du stator');
disp('=====');
disp(' ');
kws=input('kws = ');

disp(' ');
disp('Entrer le facteur de bobinage du rotor');
disp('=====');
disp(' ');
kwr=input('kwr = ');

disp(' ');
disp('Rapport de transforation');
disp('=====');

```

```

disp(' ');
u=Ns*kws/(Nr*kwr)

%% Facteur de Carter

ks=(bls/d)/(5+(bls/d));
kr=(blr/d)/(5+blr/d);
Kcs=Tus/(Tus-bl*s*ks);
Kcr=Tur/(Tur-kr*blr);

disp(' ');
disp('Facteur de Carter');
disp('=====');
disp(' ');
Kc=Kcr*Kcs

%% Inductance de champ principal

disp(' ');
disp('Inductance de champ principal' );
disp('=====');
disp(' ');
disp('Stator' );
Xhs=48*f*Tps*ls/(p*d*Kc)*(Ns*kws)^2*10^(-7)
Lhs=Xhs/(2*pi*f)
disp('Rotor' );
Xhr=48*f*Tpr*lr/(p*d*Kc)*(Nr*kwr)^2*10^(-7)
Lhr=Xhr/(2*pi*f)
disp('Rotor rapportée au primaire' );
Xhr_prim=Xhr*u^2
Lhr_prim=Xhr_prim/(2*pi*f)

%% Inductance du fuite des têtes bobines

lws=2*0.1*0.55+Tps*0.35;
lwr=2*0.12*0.55+Tpr*0.35;
Lws=4*m/Qs*qs*Ns^2*u0*lws;
Lwr=4*m/qr*qr*Nr^2*u0*lwr;

disp(' ');
disp('Inductance de fuite des têtes de bobines' );
disp('=====');
disp(' ');
disp('Stator' );
Xws=2*pi*f*Lws
Lws
disp('Rotor' );
Xwr=2*pi*f*Lwr
Lwr

%% Inductance de fuite d'encoche

LambdaPhiNs=30/(3*11)+1; %Selon les dimesnion de l'encoche du staor

```

```
LambdaPhiNr=25.7/(3*8.5)+2.5/3.1; %Selon les dimesnion de l'encoche du rotror
```

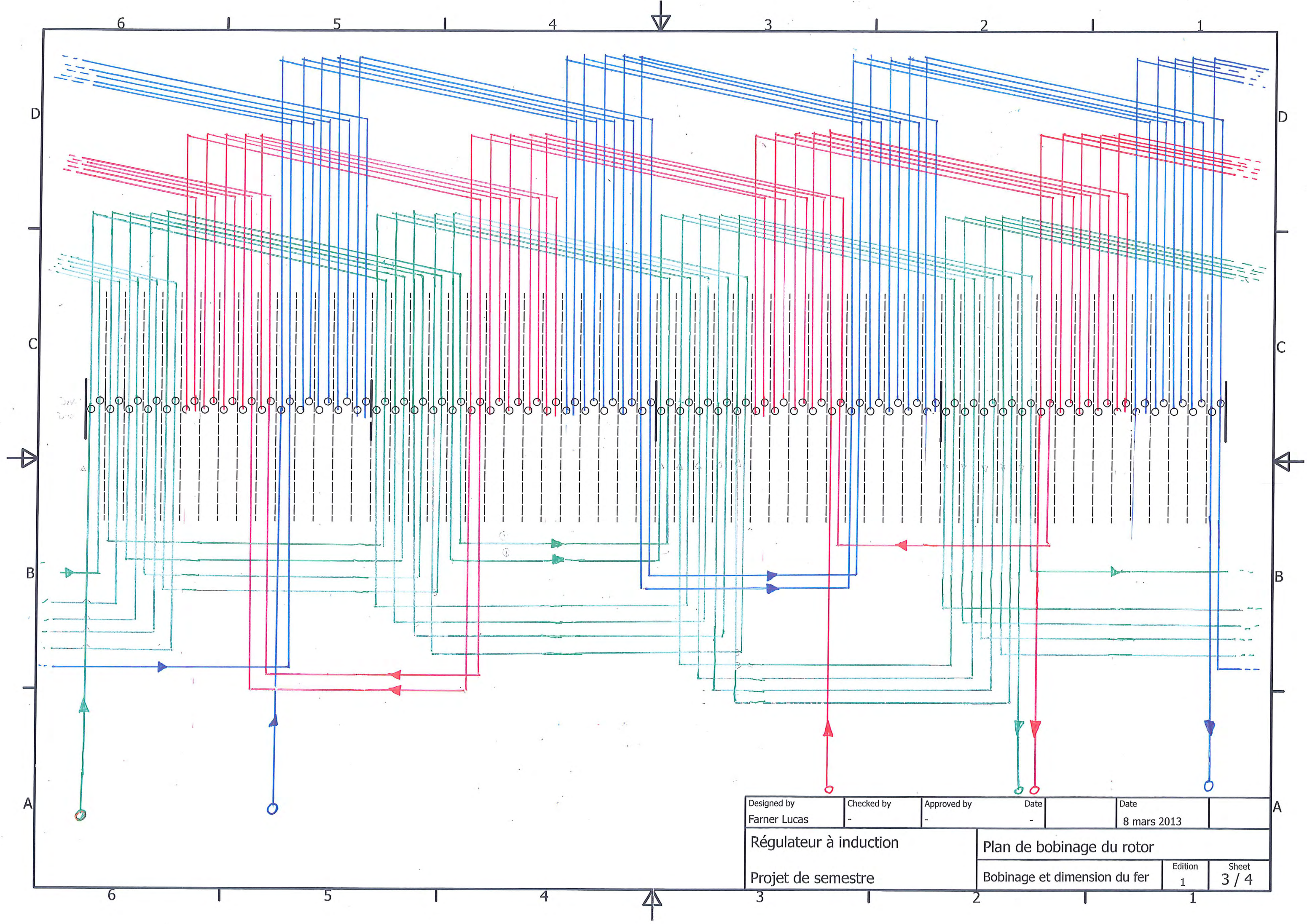
```
disp(' ');
disp('Inductance de fuite des encoches' );
disp('=====');
disp(' ');
disp('Stator' );
Xes=16*pi^2*f*Ns^2/(p*qs)*ls*LambdaPhiNs*10^(-7)
Les=Xes/(2*f*pi)
disp('Rotor' );
Xer=16*pi^2*f*Nr^2/(p*qr)*lr*LambdaPhiNr*10^(-7)
Ler=Xer/(2*f*pi)
```

```
%% Inductance de fuite total
```

```
disp(' ');
disp('Inductance de fuite totale' );
disp('=====');
disp(' ');
disp('Stator' );
Xs=Xes+Xws
Ls=Xs/(2*f*pi)
disp('Rotor' );
Xr=Xer+Xwr
Lr=Xr/(2*f*pi)
disp('Rotor rapportée au primaire' );
Xr_prim=Xr*u^2
Lr_prim=Xr_prim/(2*f*pi)
```

Annexe 4

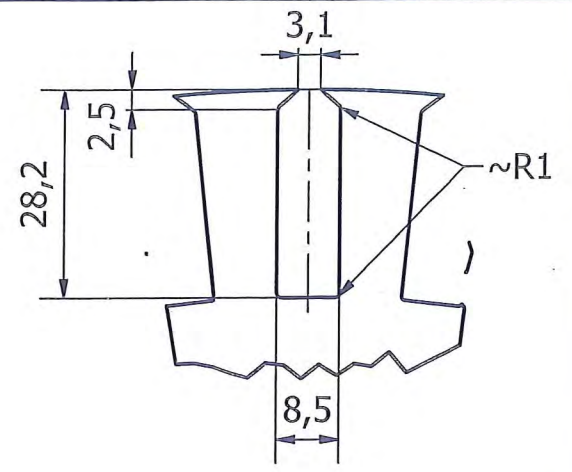
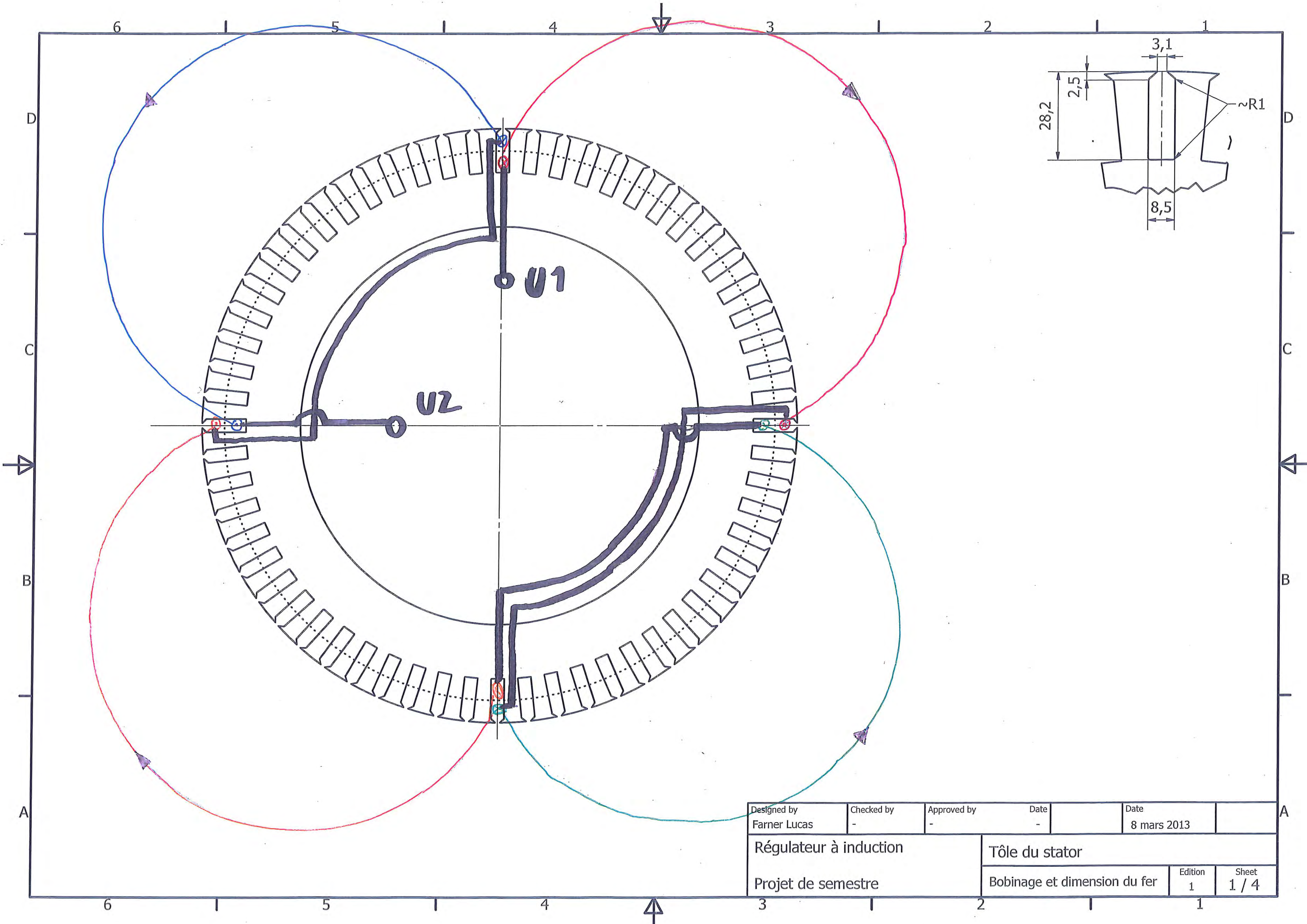
Principe de bobinage en demi-rainure



Designed by Farner Lucas	Checked by -	Approved by -	Date -	Date 8 mars 2013	
Régulateur à induction			Plan de bobinage du rotor		
Projet de semestre			Bobinage et dimension du fer	Edition 1	Sheet 3 / 4

Annexe 5

**Schéma de bobinage du rotor du
régulateur à induction initiale**



Designed by Farner Lucas	Checked by -	Approved by -	Date -	Date 8 mars 2013	
Régulateur à induction			Tôle du stator		
Projet de semestre			Bobinage et dimension du fer	Edition 1	Sheet 1 / 4

Annexe 7

**Facteur de remplissage, résistance des
enroulements et masse du cuivre en
fonction du type de bobinage**

Dimensions et facteur de remplissage limite

Rotor	Largeur encoche [mm]	8.50
	Hauteur encoche [mm]	25.70
	Air encoche [mm ²]	218.45
Stator	Largeur encoche [mm]	30
	Hauteur encoche [mm]	11
	Air encoche [mm ²]	330
Fil	Diamètre du fil [mm]	1.4
	Section du fil [mm ²]	1.54

	Rotor	Stator
Facteur de bobinage trop bas	0.3	0.25
Facteur de bobinage trop haut	0.451	0.375

Possibilités de bobinage

N _{phase rotor}	N _{phase stator}	N _{spires par ncoche}	
		Rotor	Stator
60		6	5
90	84	9	7
100	96	10	8
120		12	10
180		18	15
240		24	20
300		30	25
360		36	30
420		42	35
480		48	40
540		54	45
600		60	50
660		66	55

Facteur de remplissage au stator en fonction du nombre de spires et du nombre de câbles en parallèles

		Nombre de fils en parallèles par bobine														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nombre de spires par encoche	5	0.02	0.05	0.07	0.09	0.12	0.14	0.16	0.19	0.21	0.23	0.26	0.28	0.30	0.33	0.35
	7	0.03	0.07	0.10	0.13	0.16	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33	0.36	0.39	0.42	0.46	0.49
	8	0.04	0.07	0.11	0.15	0.19	0.22	0.26	0.30	0.34	0.37	0.41	0.45	0.49	0.52	0.56
	10	0.05	0.09	0.14	0.19	0.23	0.28	0.33	0.37	0.42	0.47	0.51	0.56	0.61	0.65	0.70
	15	0.07	0.14	0.21	0.28	0.35	0.42	0.49	0.56	0.63	0.70	0.77	0.84	0.91	0.98	1.05
	20	0.09	0.19	0.28	0.37	0.47	0.56	0.65	0.75	0.84	0.93	1.03	1.12	1.21	1.31	1.40
	25	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.93	1.05	1.17	1.28	1.40	1.52	1.63	1.75
	30	0.14	0.28	0.42	0.56	0.70	0.84	0.98	1.12	1.26	1.40	1.54	1.68	1.82	1.96	2.10
	35	0.16	0.33	0.49	0.65	0.82	0.98	1.14	1.31	1.47	1.63	1.80	1.96	2.12	2.29	2.45
	40	0.19	0.37	0.56	0.75	0.93	1.12	1.31	1.49	1.68	1.87	2.05	2.24	2.43	2.61	2.80
	45	0.21	0.42	0.63	0.84	1.05	1.26	1.47	1.68	1.89	2.10	2.31	2.52	2.73	2.94	3.15
	50	0.23	0.47	0.70	0.93	1.17	1.40	1.63	1.87	2.10	2.33	2.57	2.80	3.03	3.27	3.50
	55	0.26	0.51	0.77	1.03	1.28	1.54	1.80	2.05	2.31	2.57	2.82	3.08	3.34	3.59	3.85

Facteur de remplissage au rotor en fonction du nombre de spires et du nombre de câbles en parallèles

		Nombre de fils en parallèles par bobine									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de spires par encoche	6	0.04	0.08	0.13	0.17	0.21	0.25	0.30	0.34	0.38	0.42
	9	0.06	0.13	0.19	0.25	0.32	0.38	0.44	0.51	0.57	0.63
	10	0.07	0.14	0.21	0.28	0.35	0.42	0.49	0.56	0.63	0.70
	12	0.08	0.17	0.25	0.34	0.42	0.51	0.59	0.68	0.76	0.85
	18	0.13	0.25	0.38	0.51	0.63	0.76	0.89	1.01	1.14	1.27
	24	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85	1.01	1.18	1.35	1.52	1.69
	30	0.21	0.42	0.63	0.85	1.06	1.27	1.48	1.69	1.90	2.11
	36	0.25	0.51	0.76	1.01	1.27	1.52	1.78	2.03	2.28	2.54
	42	0.30	0.59	0.89	1.18	1.48	1.78	2.07	2.37	2.66	2.96
	48	0.34	0.68	1.01	1.35	1.69	2.03	2.37	2.71	3.04	3.38
	54	0.38	0.76	1.14	1.52	1.90	2.28	2.66	3.04	3.42	3.81
	60	0.42	0.85	1.27	1.69	2.11	2.54	2.96	3.38	3.81	4.23
	66	0.47	0.93	1.40	1.86	2.33	2.79	3.26	3.72	4.19	4.65

Résistance estimée de la phase du stator en fonction du nombre de spires et du nombre de câbles en parallèles

		Nombre de fils en parallèles par bobine														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nombre de spires par encoche	5	0.668	0.334	0.223	0.167	0.134	0.111	0.095	0.083	0.074	0.067	0.061	0.056	0.051	0.048	0.045
	7	0.935	0.468	0.312	0.234	0.187	0.156	0.134	0.117	0.104	0.094	0.085	0.078	0.072	0.067	0.062
	8	1.069	0.534	0.356	0.267	0.214	0.178	0.153	0.134	0.119	0.107	0.097	0.089	0.082	0.076	0.071
	10	1.336	0.668	0.445	0.334	0.267	0.223	0.191	0.167	0.148	0.134	0.121	0.111	0.103	0.095	0.089
	15	2.004	1.002	0.668	0.501	0.401	0.334	0.286	0.250	0.223	0.200	0.182	0.167	0.154	0.143	0.134
	20	2.672	1.336	0.891	0.668	0.534	0.445	0.382	0.334	0.297	0.267	0.243	0.223	0.206	0.191	0.178
	25	3.340	1.670	1.113	0.835	0.668	0.557	0.477	0.417	0.371	0.334	0.304	0.278	0.257	0.239	0.223
	30	4.007	2.004	1.336	1.002	0.801	0.668	0.572	0.501	0.445	0.401	0.364	0.334	0.308	0.286	0.267
	35	4.675	2.338	1.558	1.169	0.935	0.779	0.668	0.584	0.519	0.468	0.425	0.390	0.360	0.334	0.312
	40	5.343	2.672	1.781	1.336	1.069	0.891	0.763	0.668	0.594	0.534	0.486	0.445	0.411	0.382	0.356
	45	6.011	3.006	2.004	1.503	1.202	1.002	0.859	0.751	0.668	0.601	0.546	0.501	0.462	0.429	0.401
	50	6.679	3.340	2.226	1.670	1.336	1.113	0.954	0.835	0.742	0.668	0.607	0.557	0.514	0.477	0.445
	55	7.347	3.673	2.449	1.837	1.469	1.224	1.050	0.918	0.816	0.735	0.668	0.612	0.565	0.525	0.490

Résistance estimée de la phase du rotor en fonction du nombre de spires et du nombre de câbles en parallèles

		Nombre de fils en parallèles par bobine									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de spires par encoche	6	0.636	0.318	0.212	0.159	0.127	0.106	0.091	0.080	0.071	0.064
	9	0.955	0.477	0.318	0.239	0.191	0.159	0.136	0.119	0.106	0.095
	10	1.061	0.530	0.354	0.265	0.212	0.177	0.152	0.133	0.118	0.106
	12	1.273	0.636	0.424	0.318	0.255	0.212	0.182	0.159	0.141	0.127
	18	1.909	0.955	0.636	0.477	0.382	0.318	0.273	0.239	0.212	0.191
	24	2.546	1.273	0.849	0.636	0.509	0.424	0.364	0.318	0.283	0.255
	30	3.182	1.591	1.061	0.796	0.636	0.530	0.455	0.398	0.354	0.318
	36	3.819	1.909	1.273	0.955	0.764	0.636	0.546	0.477	0.424	0.382
	42	4.455	2.228	1.485	1.114	0.891	0.743	0.636	0.557	0.495	0.446
	48	5.092	2.546	1.697	1.273	1.018	0.849	0.727	0.636	0.566	0.509
	54	5.728	2.864	1.909	1.432	1.146	0.955	0.818	0.716	0.636	0.573
	60	6.365	3.182	2.122	1.591	1.273	1.061	0.909	0.796	0.707	0.636
	66	7.001	3.501	2.334	1.750	1.400	1.167	1.000	0.875	0.778	0.700

Masse totale estimée du stator en fonction du nombre de spires et du nombre de câbles en parallèles

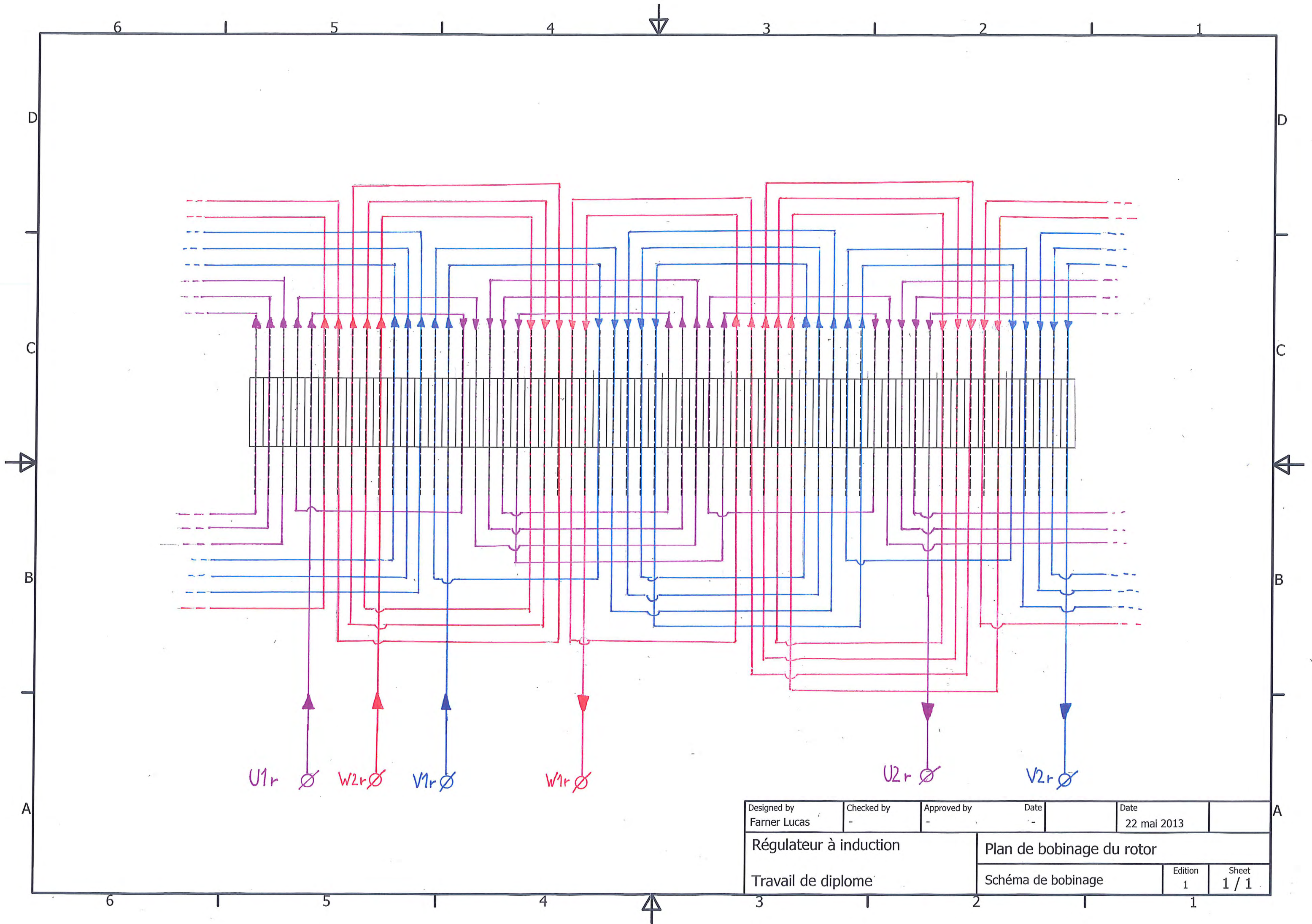
		Nombre de fils en parallèles par bobine														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nombre de spires par encoche	5	2.5	5.0	7.6	10.1	12.6	15.1	17.6	20.2	22.7	25.2	27.7	30.3	32.8	35.3	37.8
	7	3.5	7.1	10.6	14.1	17.6	21.2	24.7	28.2	31.8	35.3	38.8	42.4	45.9	49.4	52.9
	8	4.0	8.1	12.1	16.1	20.2	24.2	28.2	32.3	36.3	40.3	44.4	48.4	52.4	56.5	60.5
	10	5.0	10.1	15.1	20.2	25.2	30.3	35.3	40.3	45.4	50.4	55.5	60.5	65.5	70.6	75.6
	15	7.6	15.1	22.7	30.3	37.8	45.4	52.9	60.5	68.1	75.6	83.2	90.8	98.3	105.9	113.4
	20	10.1	20.2	30.3	40.3	50.4	60.5	70.6	80.7	90.8	100.8	110.9	121.0	131.1	141.2	151.3
	25	12.6	25.2	37.8	50.4	63.0	75.6	88.2	100.8	113.4	126.1	138.7	151.3	163.9	176.5	189.1
	30	15.1	30.3	45.4	60.5	75.6	90.8	105.9	121.0	136.1	151.3	166.4	181.5	196.6	211.8	226.9
	35	17.6	35.3	52.9	70.6	88.2	105.9	123.5	141.2	158.8	176.5	194.1	211.8	229.4	247.1	264.7
	40	20.2	40.3	60.5	80.7	100.8	121.0	141.2	161.3	181.5	201.7	221.9	242.0	262.2	282.4	302.5
	45	22.7	45.4	68.1	90.8	113.4	136.1	158.8	181.5	204.2	226.9	249.6	272.3	295.0	317.7	340.3
	50	25.2	50.4	75.6	100.8	126.1	151.3	176.5	201.7	226.9	252.1	277.3	302.5	327.7	352.9	378.2
	55	27.7	55.5	83.2	110.9	138.7	166.4	194.1	221.9	249.6	277.3	305.0	332.8	360.5	388.2	416.0

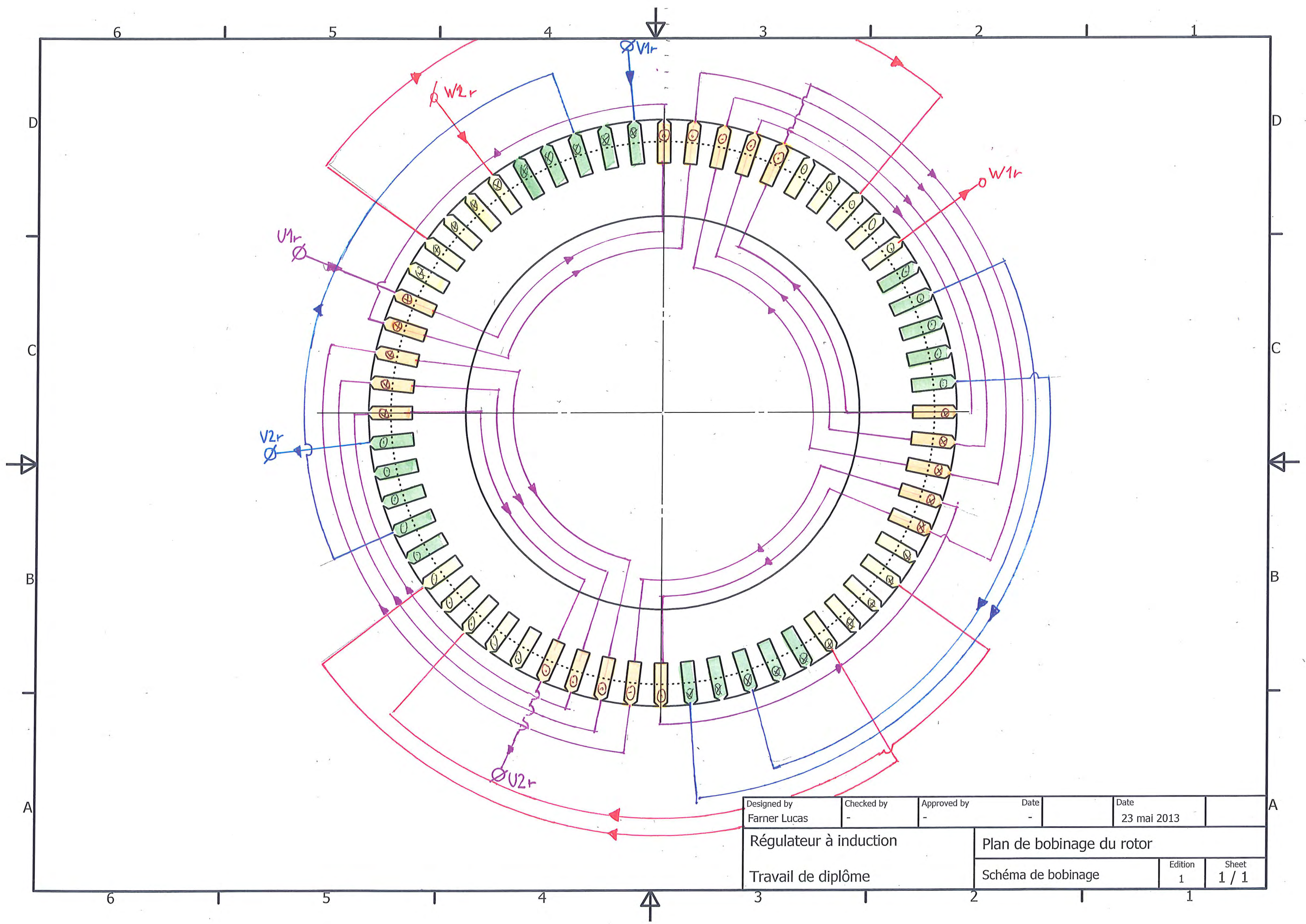
Masse totale estimée du rotor en fonction du nombre de spires et du nombre de câbles en parallèles

		Nombre de fils en parallèles par bobine									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de spires par encoche	6	2.4	4.8	7.2	9.6	12.0	14.4	16.8	19.2	21.6	24.0
	9	3.6	7.2	10.8	14.4	18.0	21.6	25.2	28.8	32.4	36.0
	10	4.0	8.0	12.0	16.0	20.0	24.0	28.0	32.0	36.0	40.0
	12	4.8	9.6	14.4	19.2	24.0	28.8	33.6	38.4	43.2	48.0
	18	7.2	14.4	21.6	28.8	36.0	43.2	50.5	57.7	64.9	72.1
	24	9.6	19.2	28.8	38.4	48.0	57.7	67.3	76.9	86.5	96.1
	30	12.0	24.0	36.0	48.0	60.1	72.1	84.1	96.1	108.1	120.1
	36	14.4	28.8	43.2	57.7	72.1	86.5	100.9	115.3	129.7	144.1
	42	16.8	33.6	50.5	67.3	84.1	100.9	117.7	134.5	151.4	168.2
	48	19.2	38.4	57.7	76.9	96.1	115.3	134.5	153.8	173.0	192.2
	54	21.6	43.2	64.9	86.5	108.1	129.7	151.4	173.0	194.6	216.2
	60	24.0	48.0	72.1	96.1	120.1	144.1	168.2	192.2	216.2	240.2
	66	26.4	52.9	79.3	105.7	132.1	158.6	185.0	211.4	237.8	264.3

Annexe 8

**Schéma de bobinage du rotor du
régulateur à induction actuel**

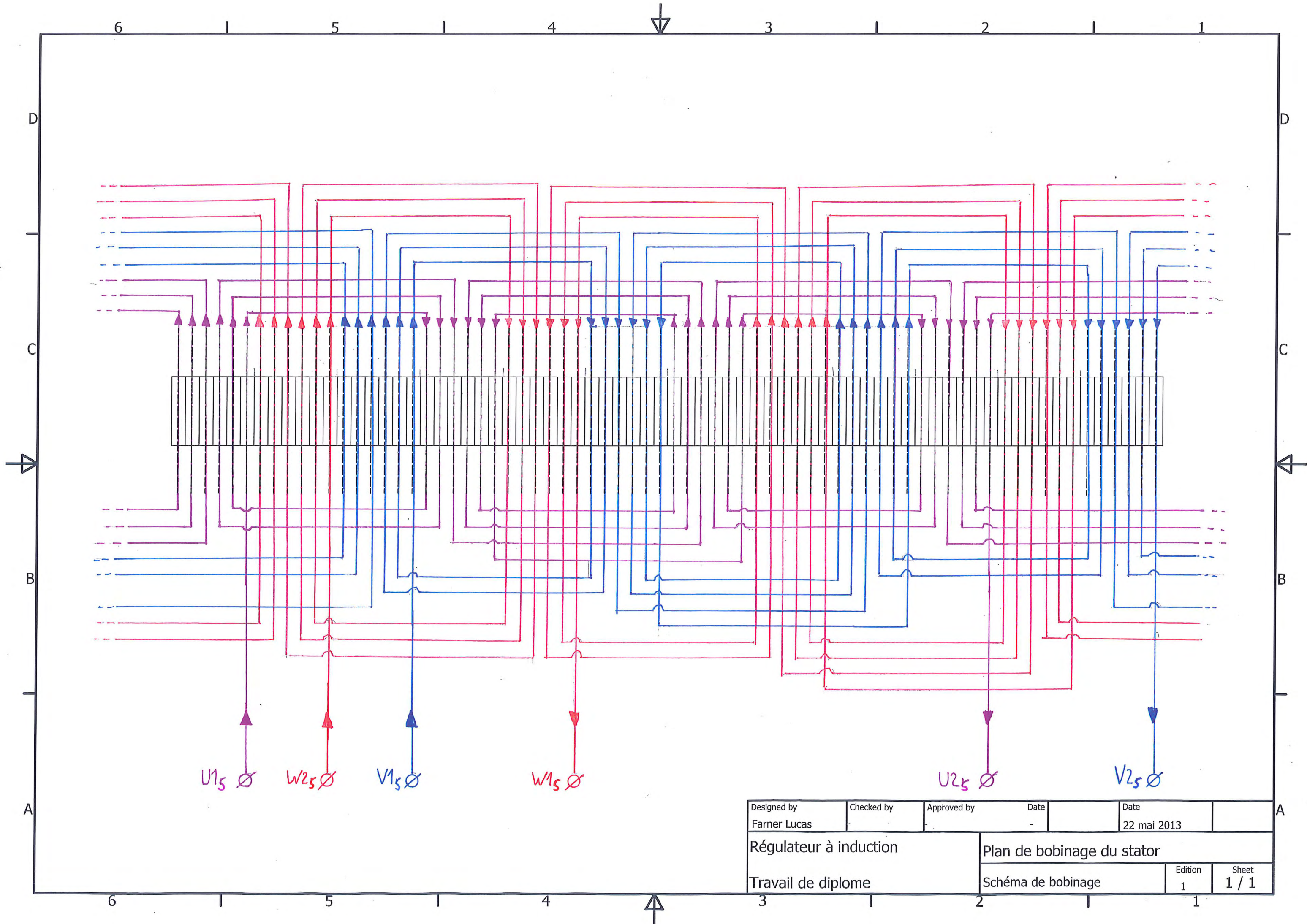




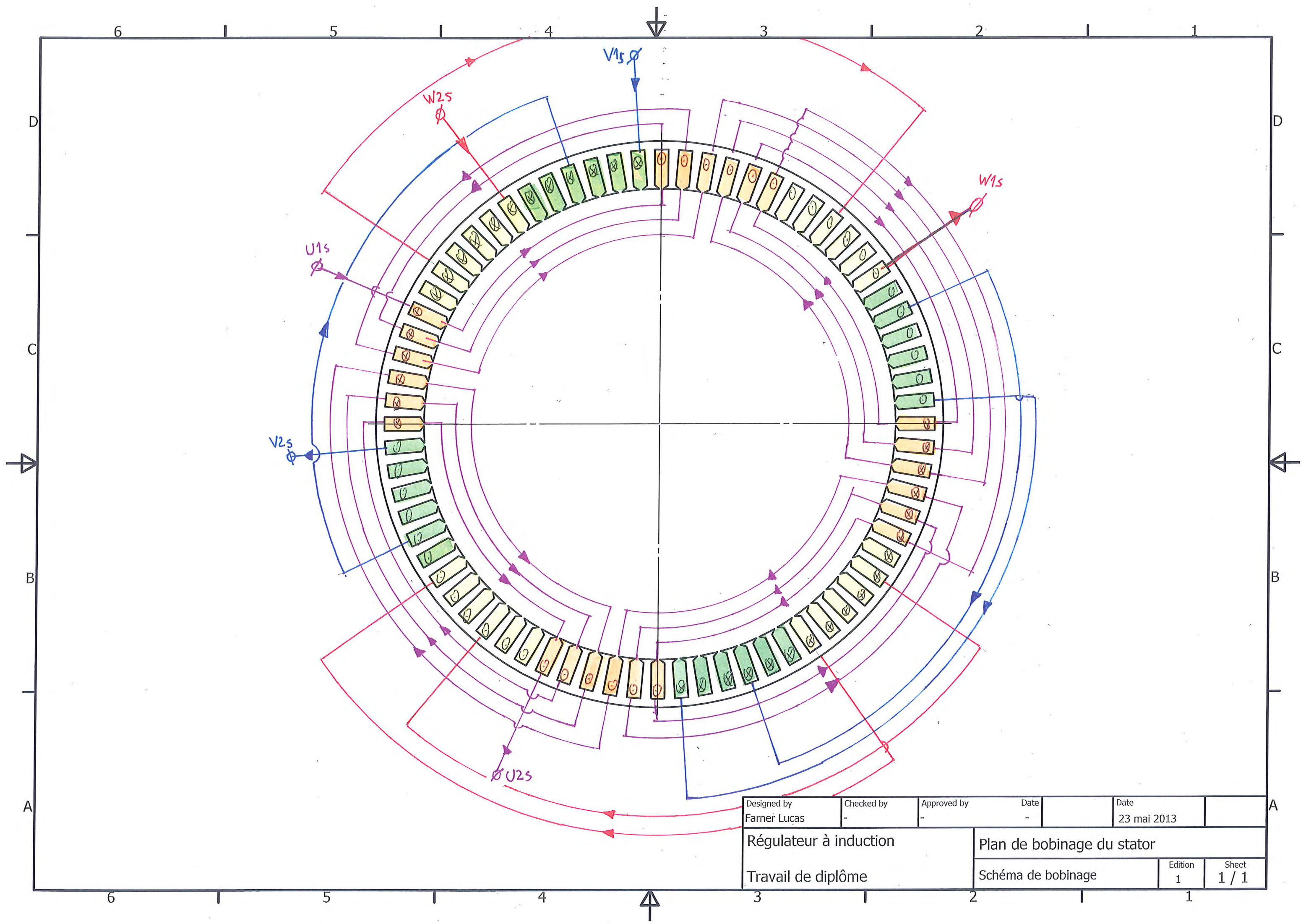
Designed by Farner Lucas	Checked by -	Approved by -	Date -	Date 23 mai 2013	
Régulateur à induction			Plan de bobinage du rotor		
Travail de diplôme			Schéma de bobinage	Edition 1	Sheet 1 / 1

Annexe 9

**Schéma de bobinage du stator du
régulateur à induction actuel**



Designed by Farner Lucas	Checked by -	Approved by -	Date -	Date 22 mai 2013	
Régulateur à induction			Plan de bobinage du stator		
Travail de diplôme			Schéma de bobinage	Edition 1	Sheet 1 / 1



Designed by Farner Lucas	Checked by -	Approved by -	Date -	Date 23 mai 2013	
Régulateur à induction			Plan de bobinage du stator		
Travail de diplôme			Schéma de bobinage	Edition 1	Sheet 1 / 1

Annexe 10

**Courbes des tests réalisés sur le
régulateur à induction actuel : calcul
analytique, simulation et mesure**

Charge ohmique 5 [kW]

**Tension de phase d'alimentation 230
[V]**

Tension de phase de sortie 220 [V]

Tensions du régulateur à induction :

Courbe n° 1 : Mesure

Courbe n° 2 : Simulation par éléments finis

Courbe n° 3 : Modèle analytique

Courants du régulateur à induction :

Courbe n° 4 : Mesure

Courbe n° 5 : Simulation par éléments finis

Courbe n° 6 : Modèle analytique

Situations tensions/courants du régulateur à induction :

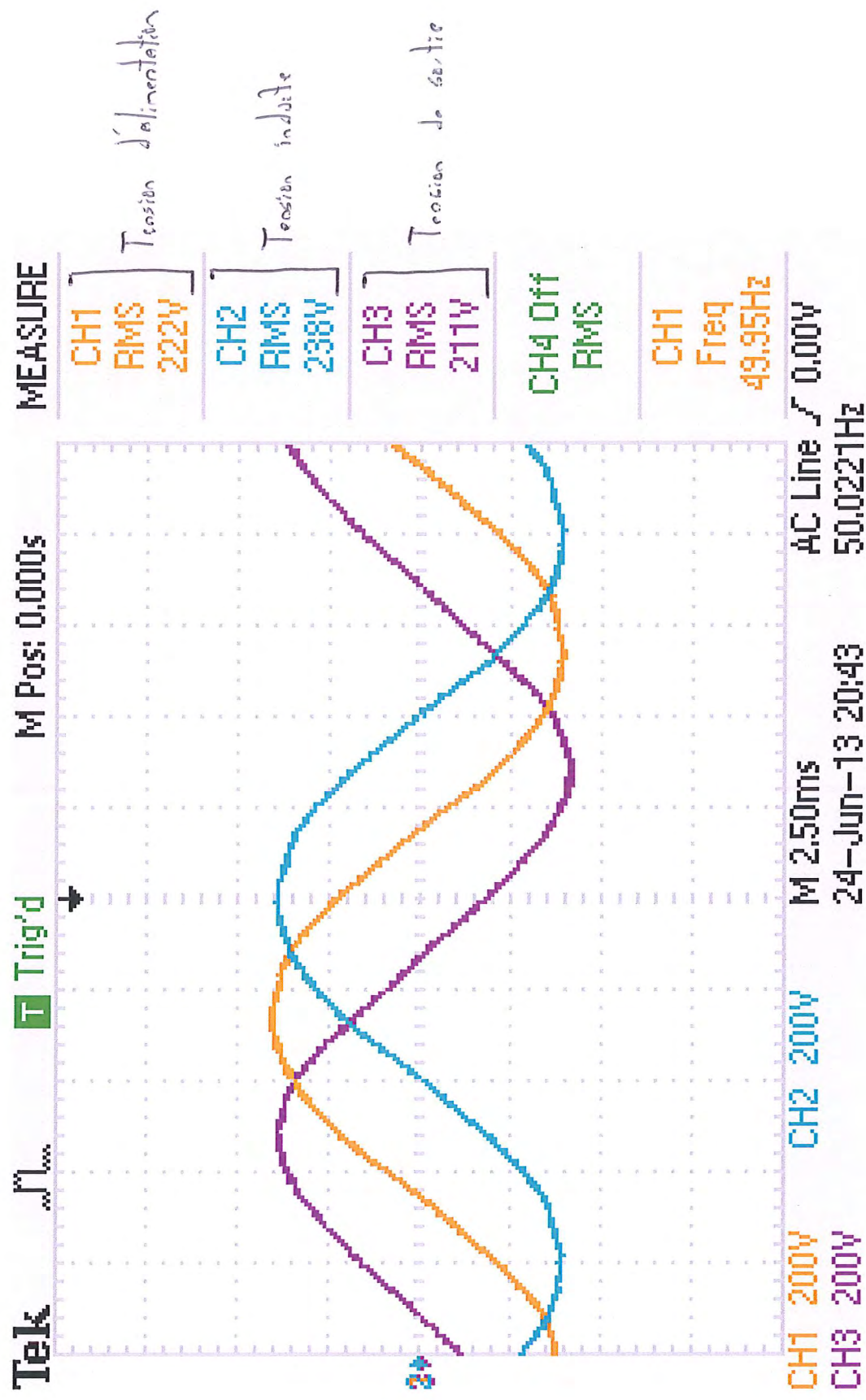
Courbe n° 7 : Mesure

Courbe n° 8 : Simulation par éléments finis

Courbe n° 9 : Modèle analytique

Valeurs : rapport principale tableau N°42

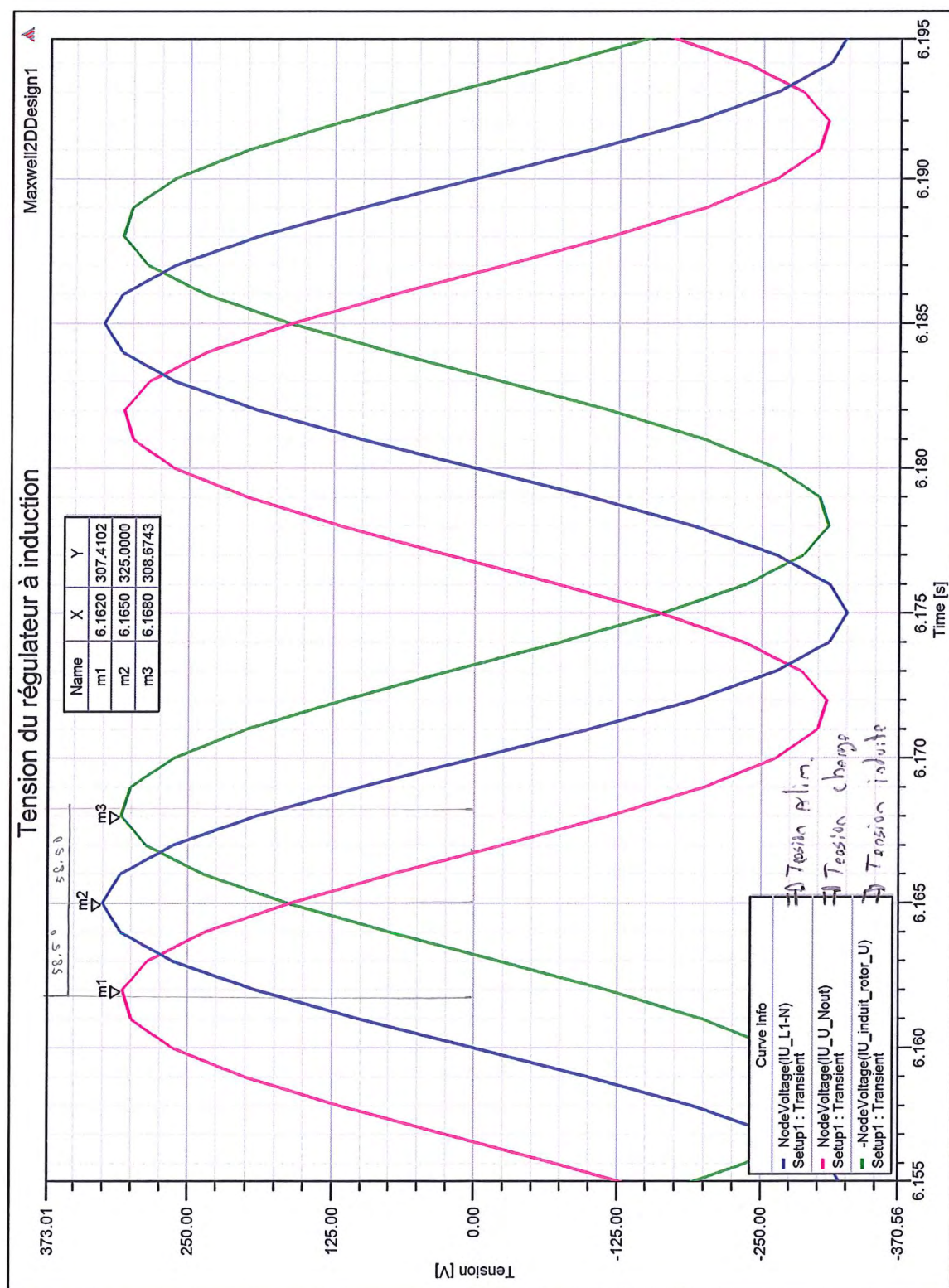
Mesure avec charge ohmique de 5 [kW] (tension de phase d'alimentation 230 [V] - tension de phase de sortie 220[V]) : Tensions du régulateur à induction

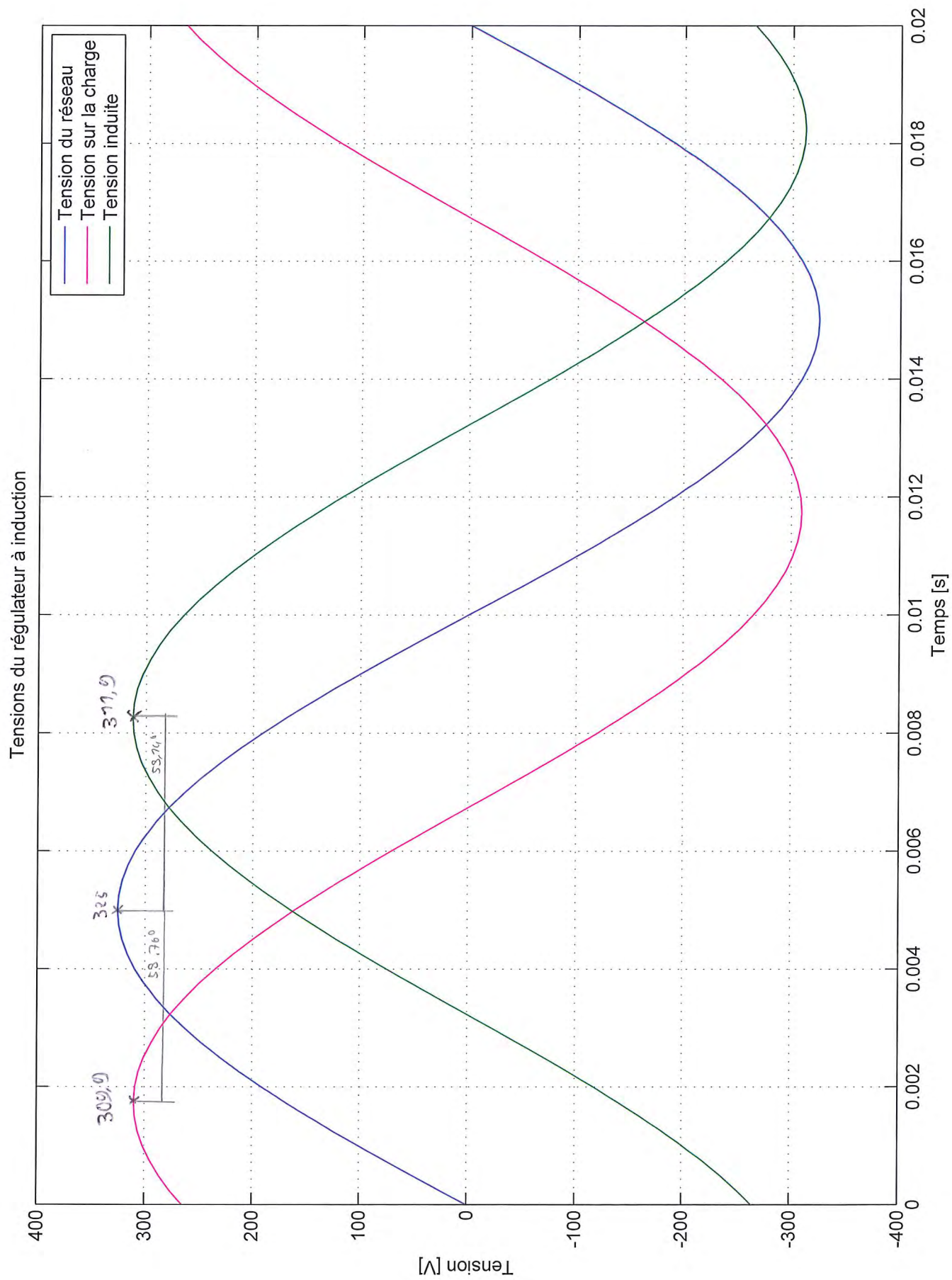


$28.8 [\Omega]$, $230[V_{\text{lim}}]$, $220[V_{\text{charge}}]$, $\alpha_{\text{mrc}} = 28.5^\circ$, $\alpha_{\text{clrc}} = 57^\circ$

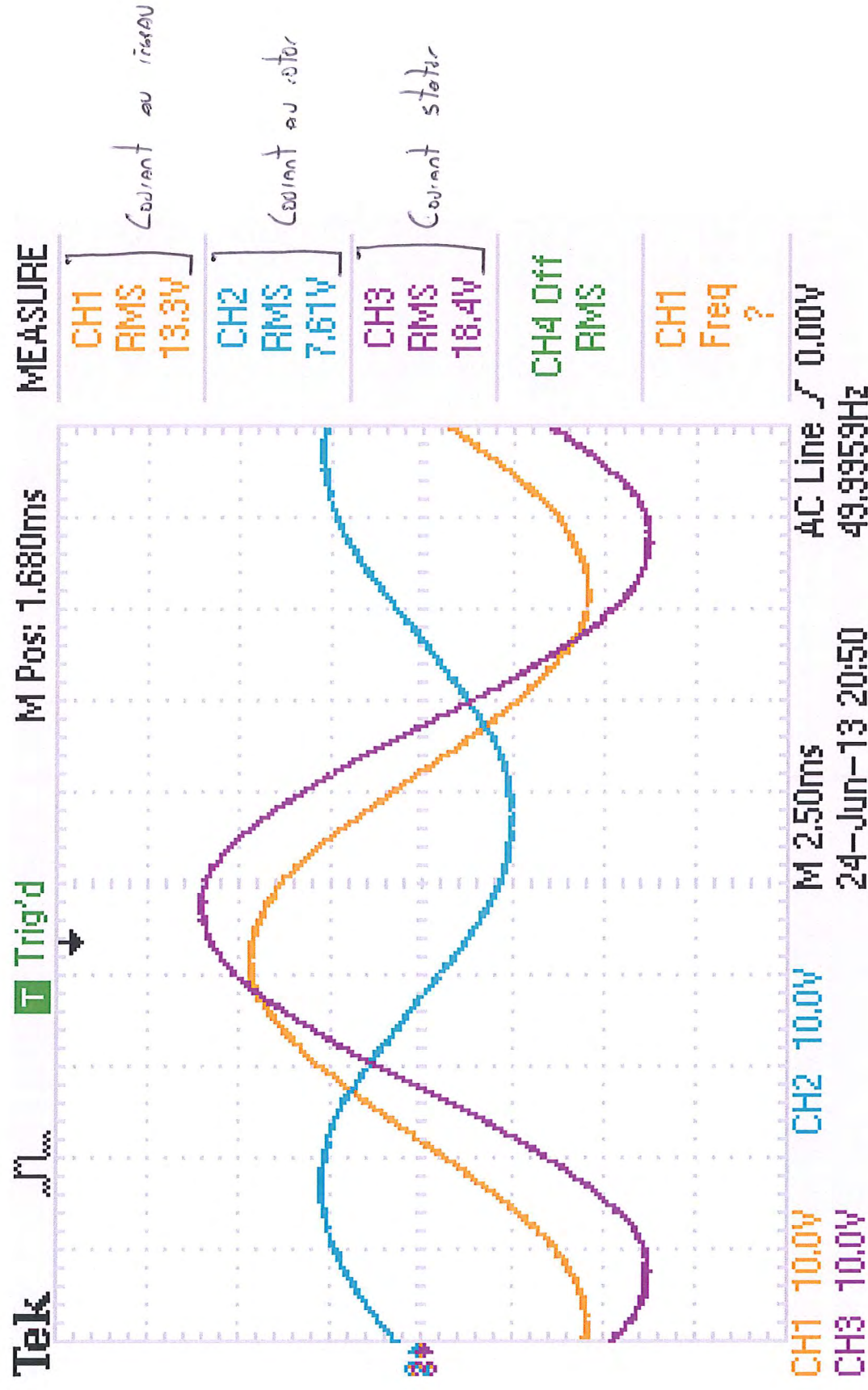
Validation simulation analytique le 29.05.2013

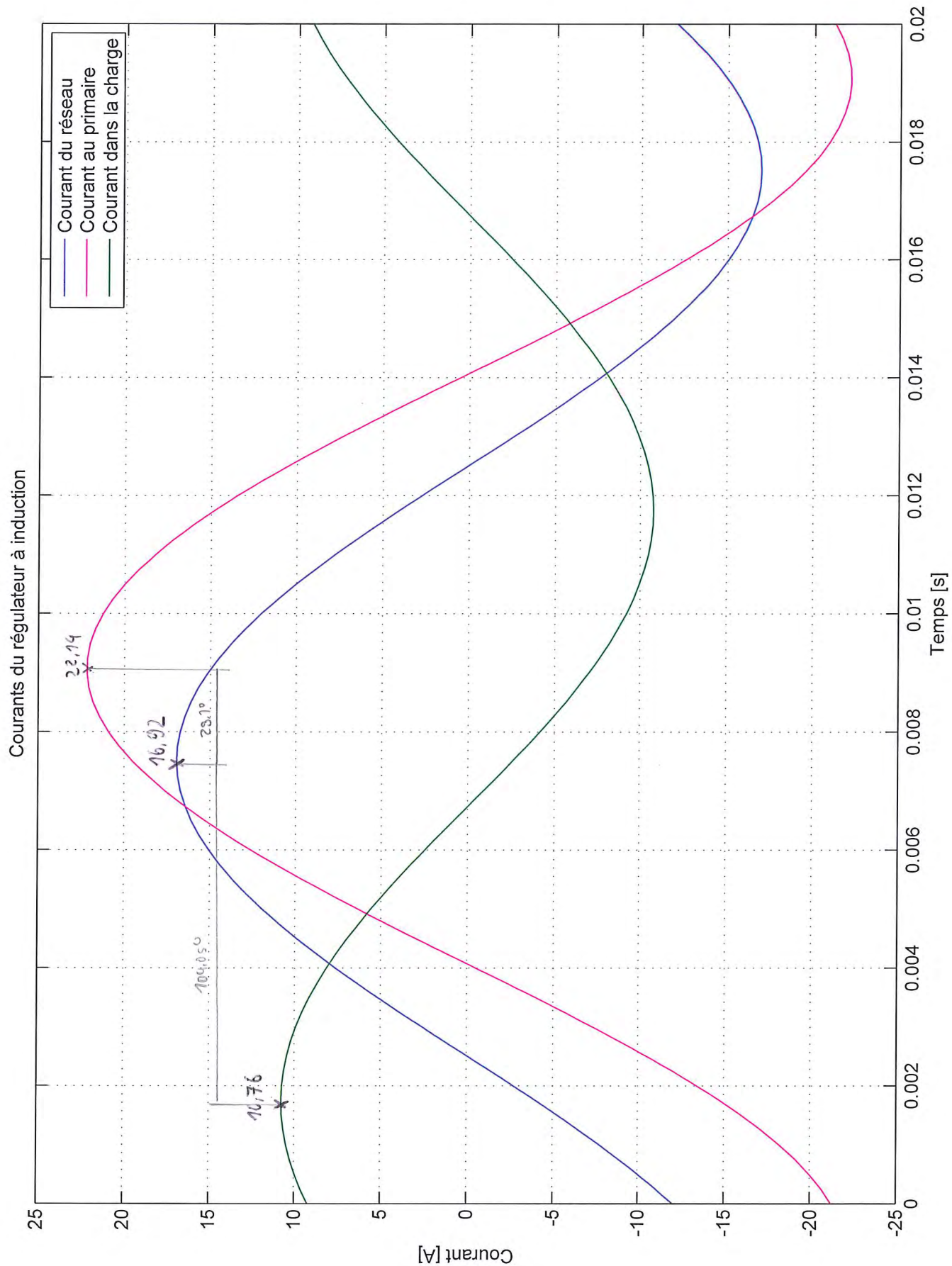
2



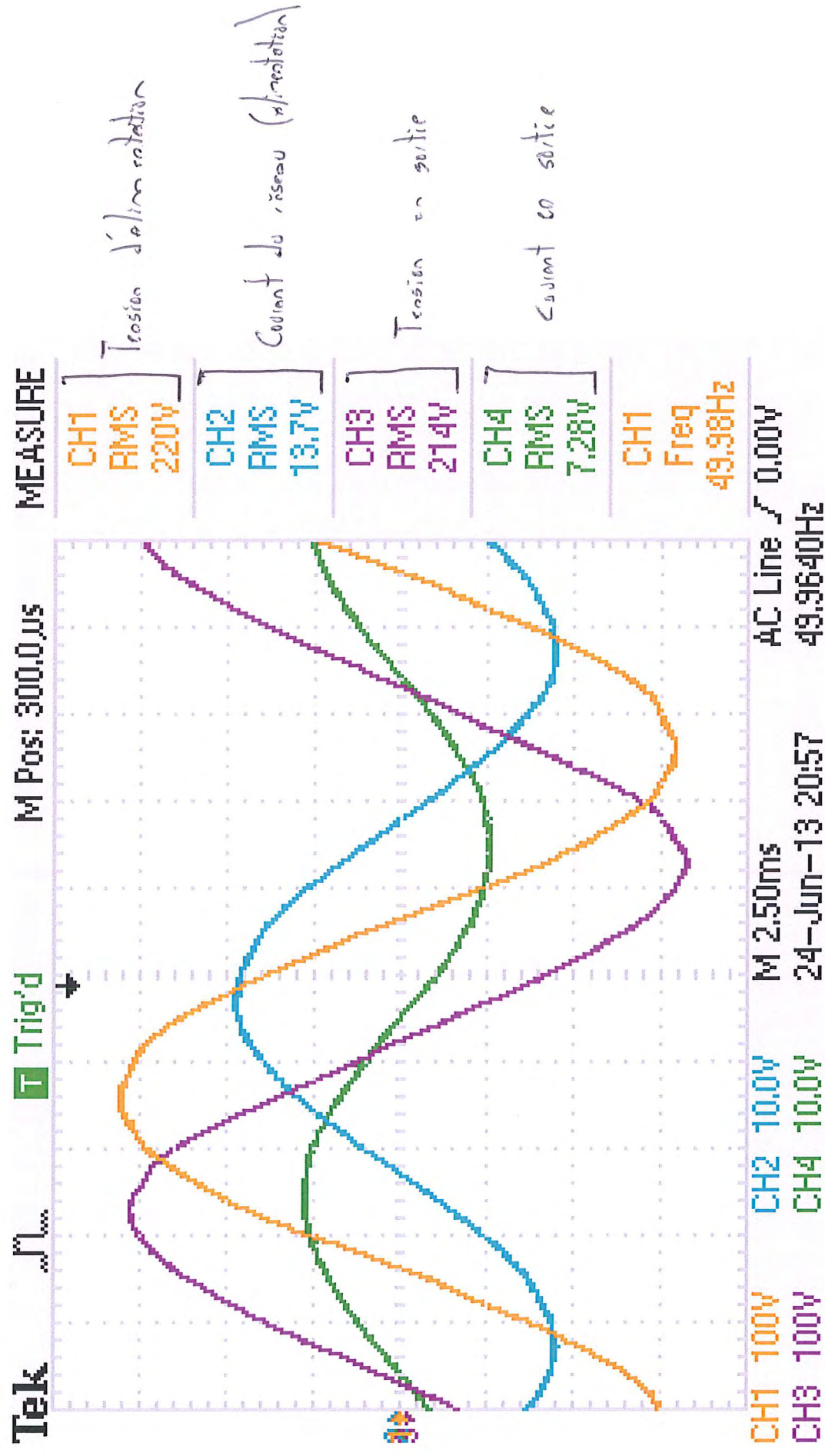


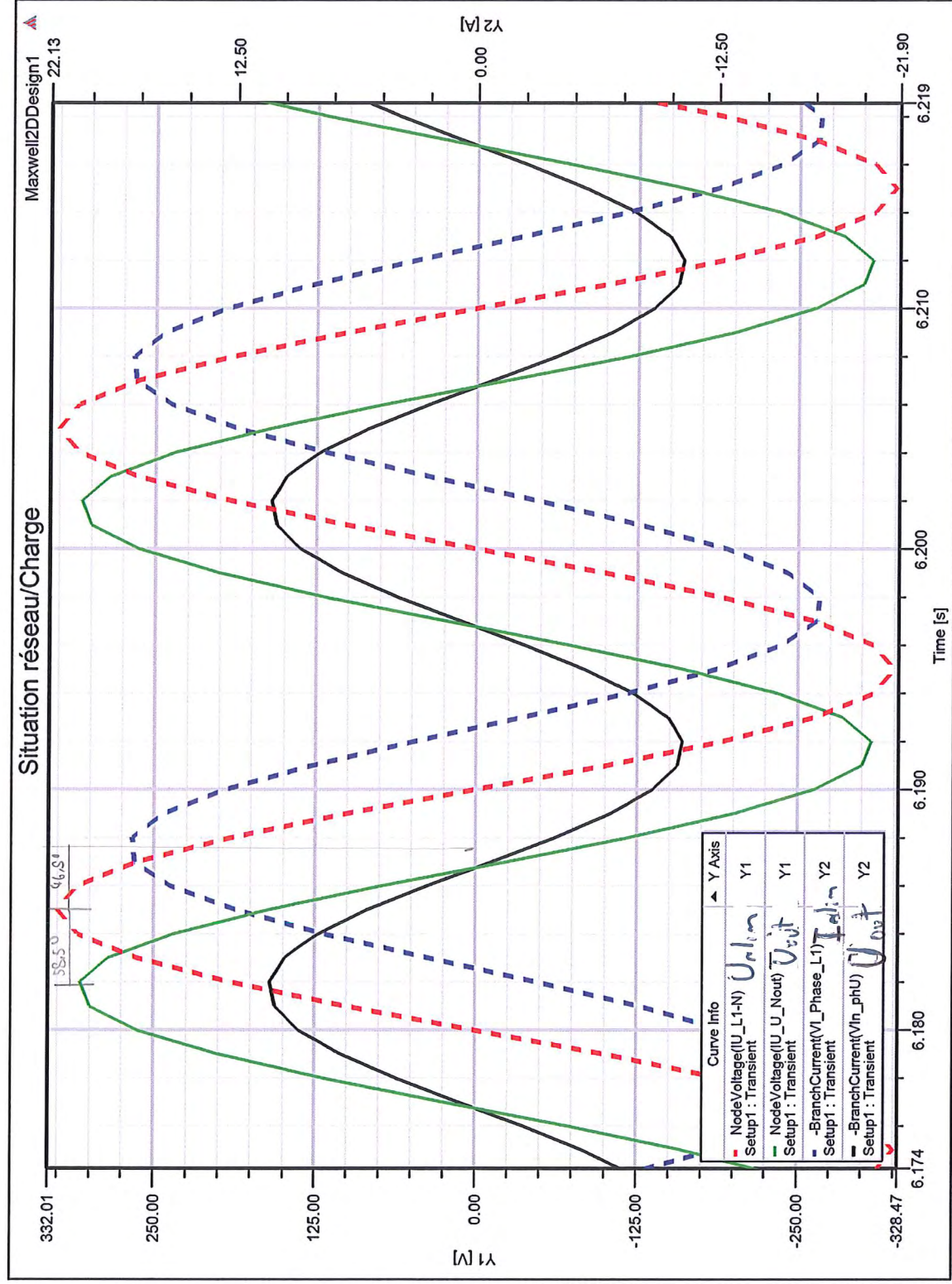
Mesure avec charge ohmique de 5 [kW] (tension de phase d'alimentation 230 [V] - tension de phase de sortie 220[V]) : Courants du régulateur à induction

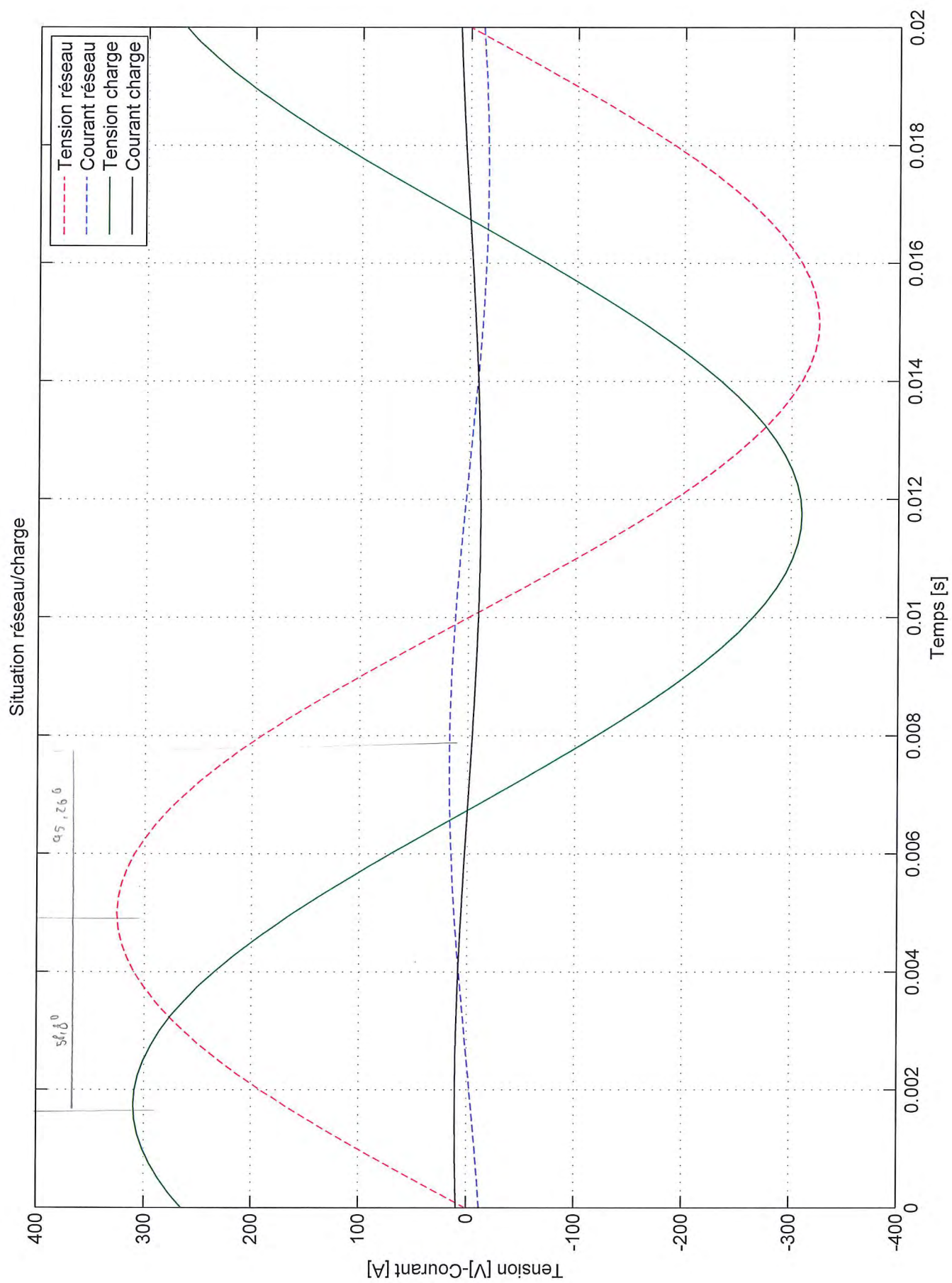




Mesure avec charge ohmique de 5 [kW] (tension de phase d'alimentation 230 [V] - tension de phase de sortie 220[V]) : Situations tensions/courant du régulateur à induction







Essai moteur 90 [kW]

**Tension de phase d'alimentation 180
[V]**

Tension de phase de sortie 230 [V]

Tensions du régulateur à induction :

Courbe n° 1 : Mesure

Courants du régulateur à induction :

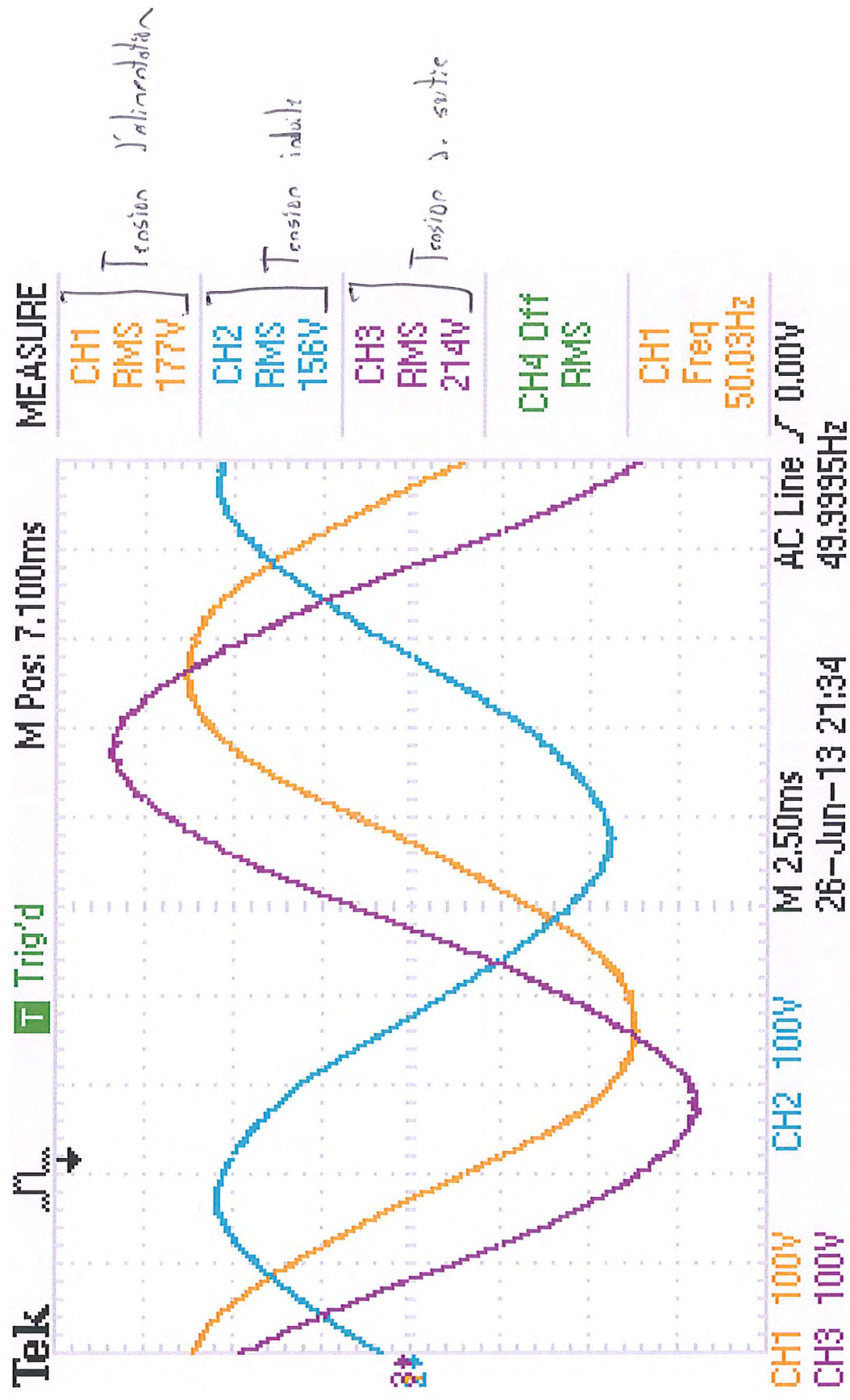
Courbe n° 2 : Mesure

Situations tensions/courants du régulateur à induction :

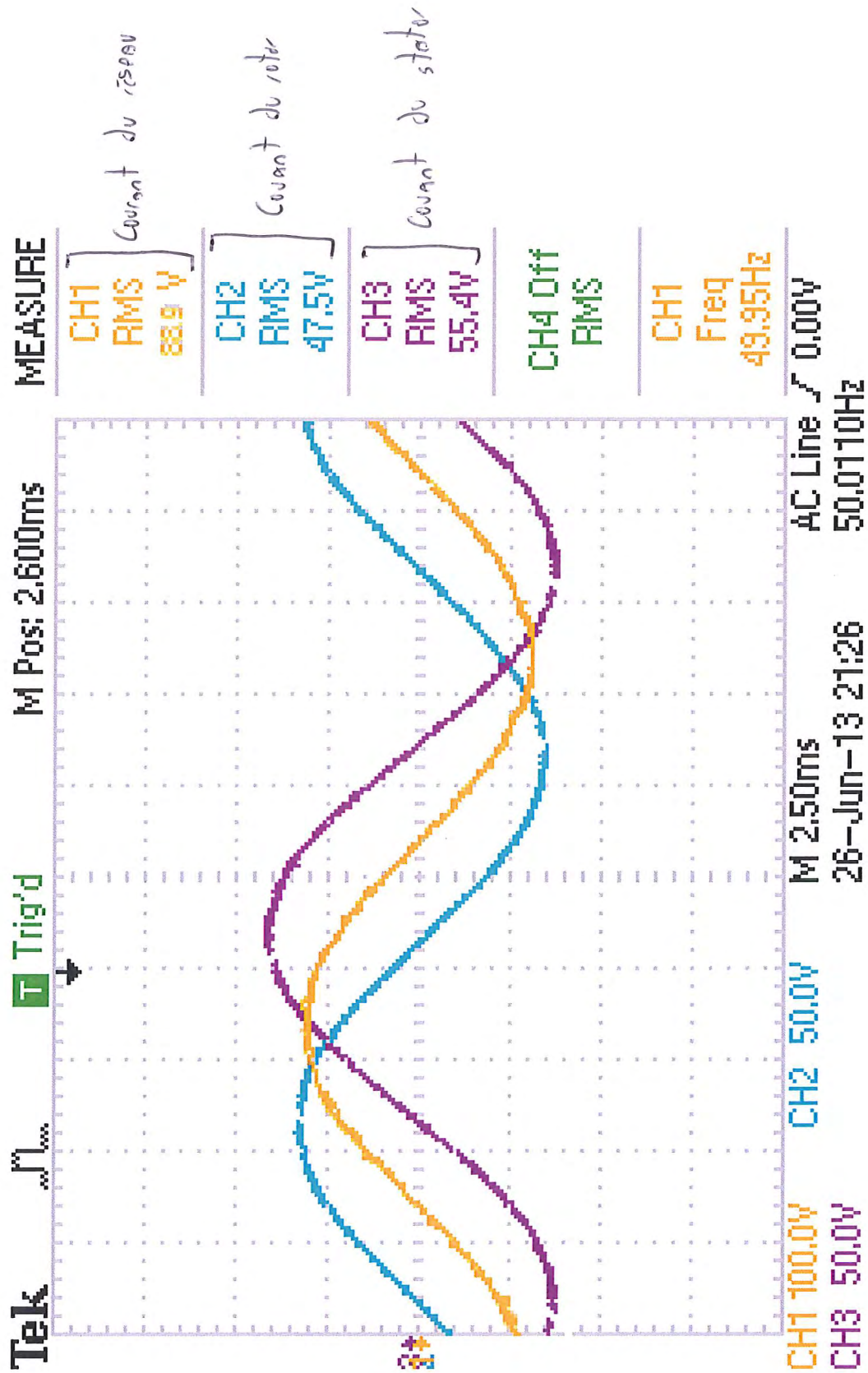
Courbe n° 3 : Mesure

Valeurs : rapport principale tableau N°43

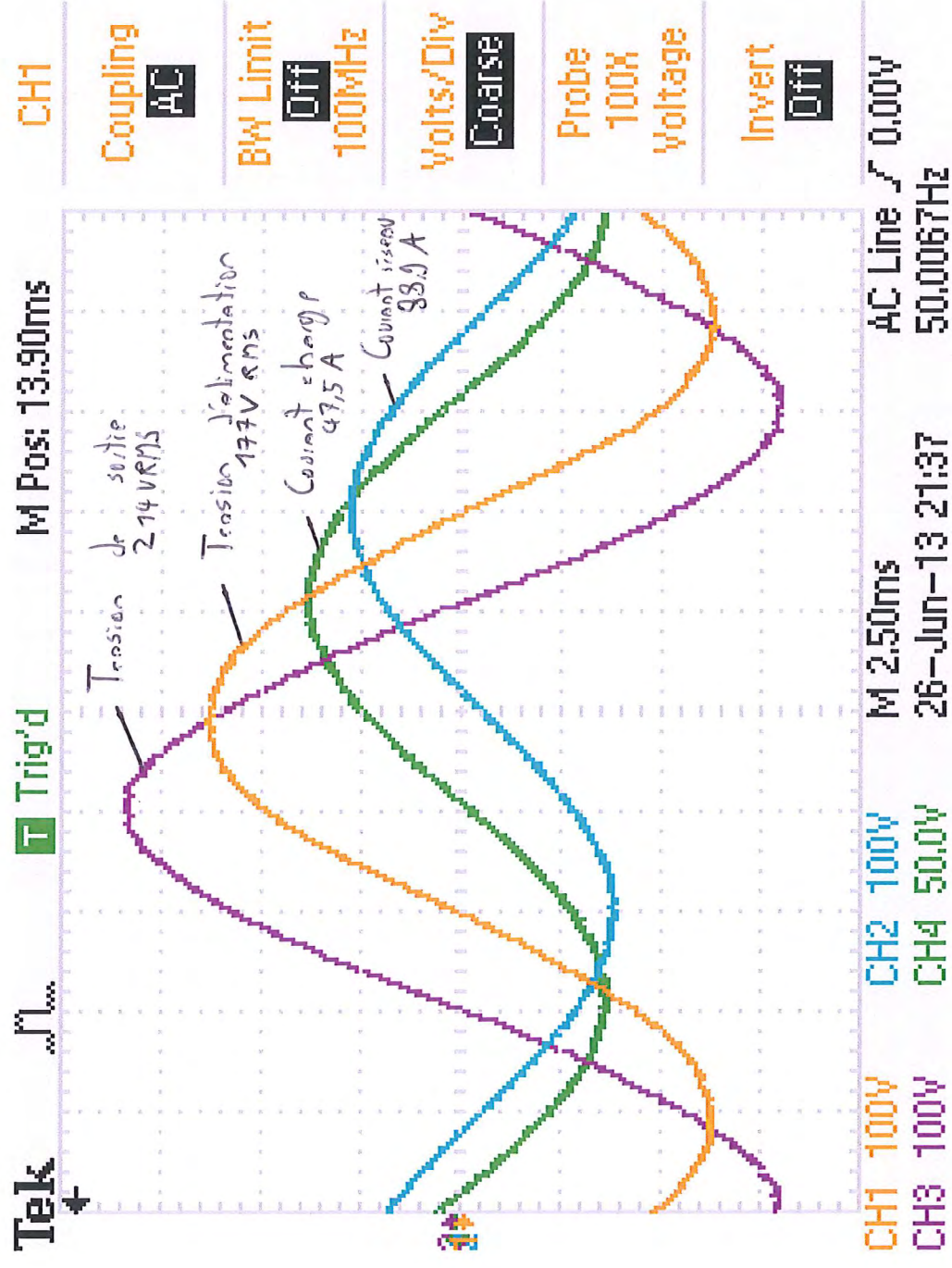
Mesure avec moteur asynchrone de 90 [kW] (tension de phase d'alimentation 180 [V] - tension de phase de sortie 230 [V]) : Tensions du régulateur à induction



Mesure avec moteur asynchrone de 90 [kW] (tension de phase d'alimentation 180 [V] - tension de phase de sortie 230 [V]) : Courants du régulateur à induction



Mesure avec moteur asynchrone de 90 [kW] (tension de phase d'alimentation 180 [V] - tension de phase de sortie 230 [V]) : Situations tensions/courant ζ du régulateur à induction



Essai moteur 75 [kW]

**Tension de phase d'alimentation 230
[V]**

Tension de phase de sortie 230 [V]

Tensions du régulateur à induction :

Courbe n° 1 : Simulation par éléments finis

Courbe n° 2 : Modèle analytique

Courants du régulateur à induction :

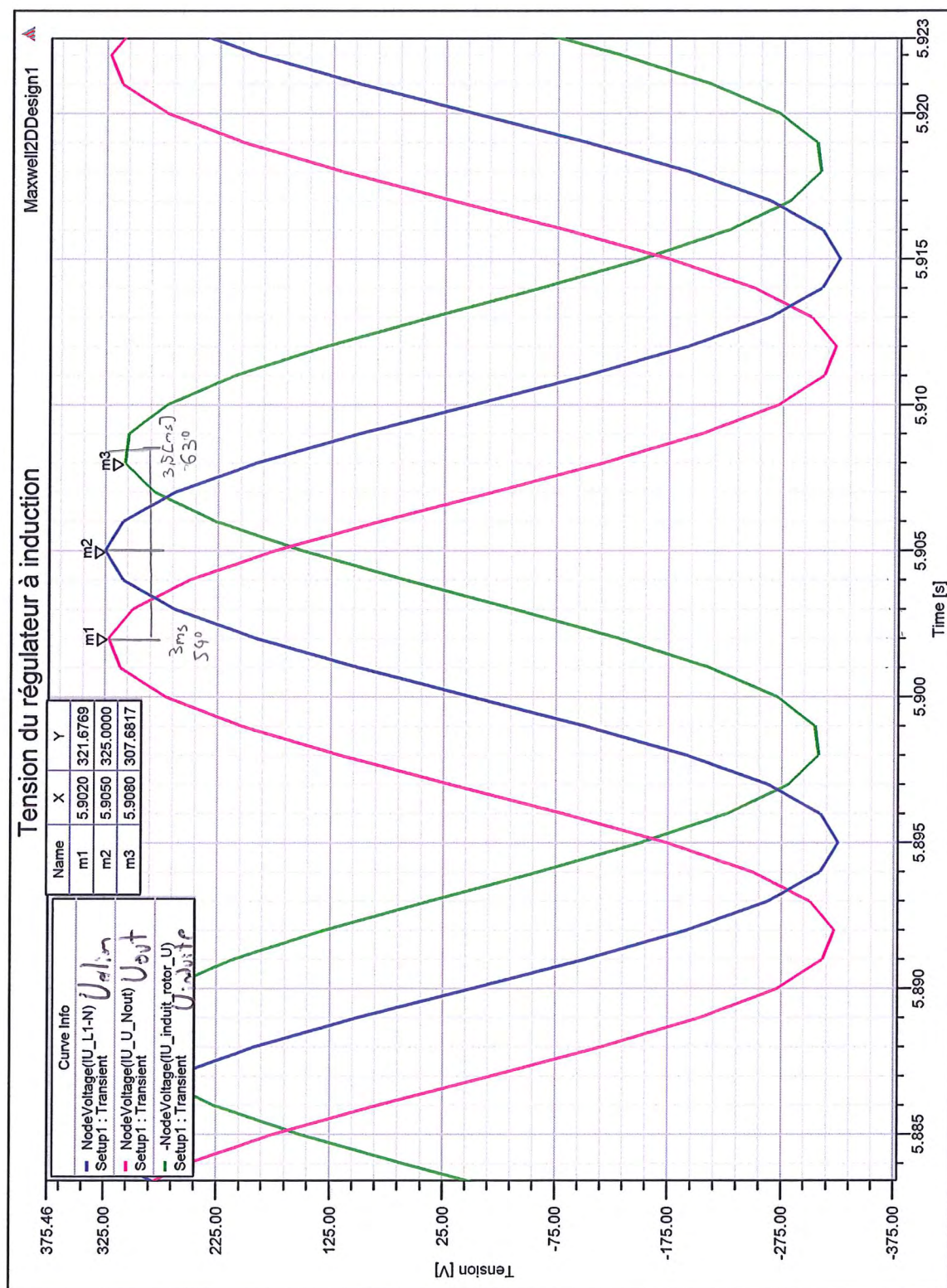
Courbe n° 3 : Simulation par éléments finis

Courbe n° 4 : Modèle analytique

Situations tensions/courants du régulateur à induction :

Courbe n° 5 : Simulation par éléments finis

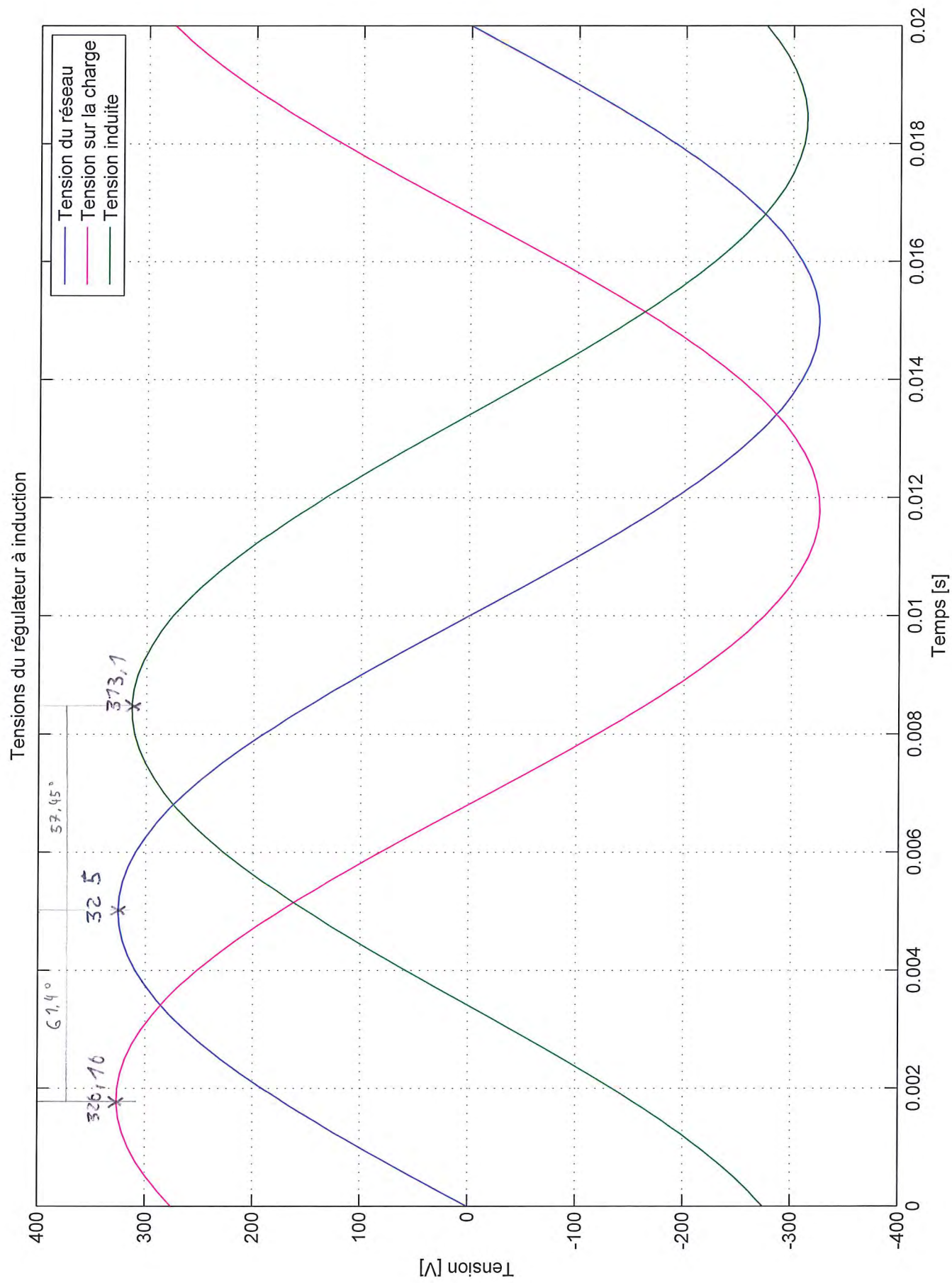
Courbe n° 6 : Modèle analytique

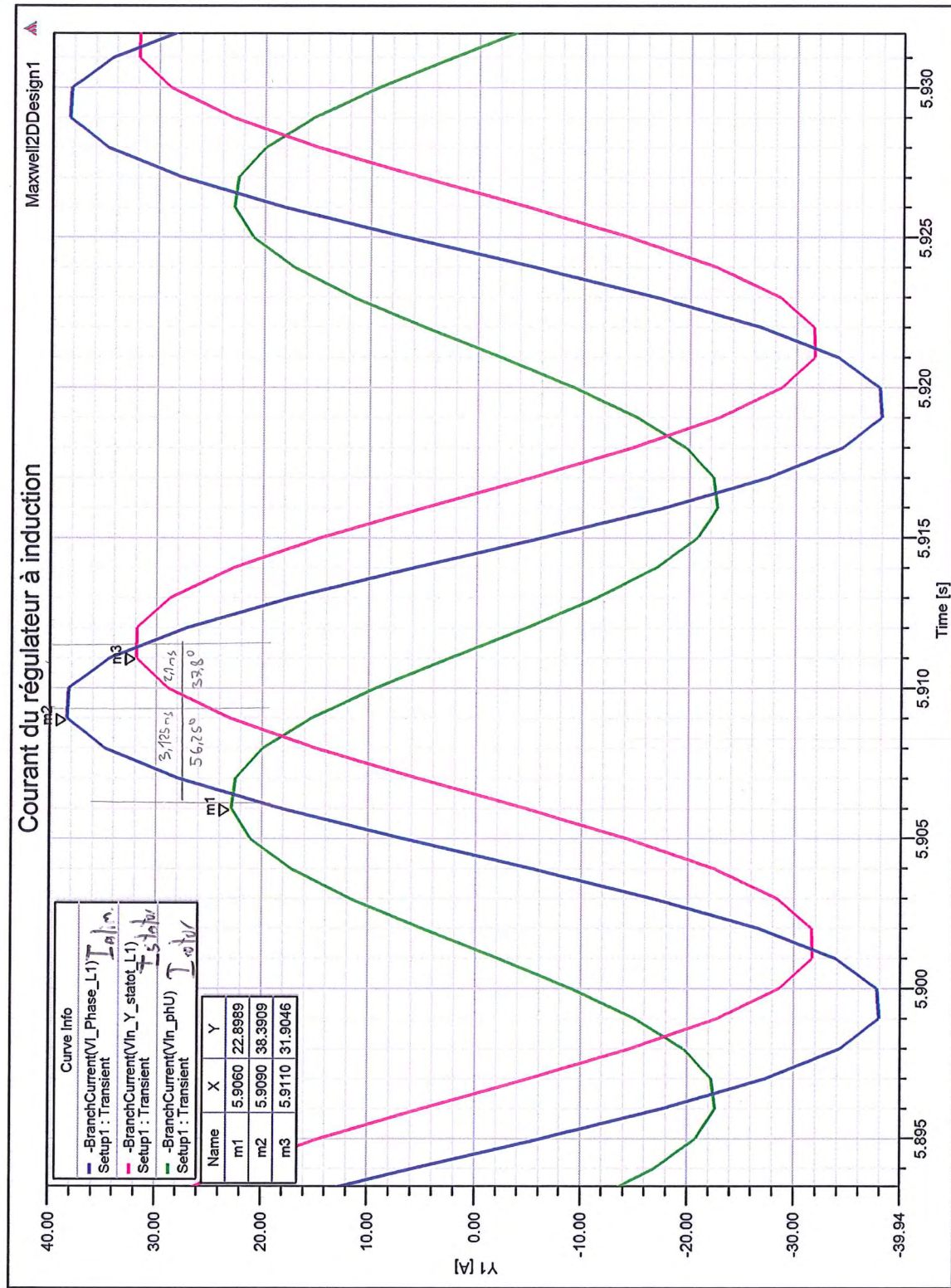


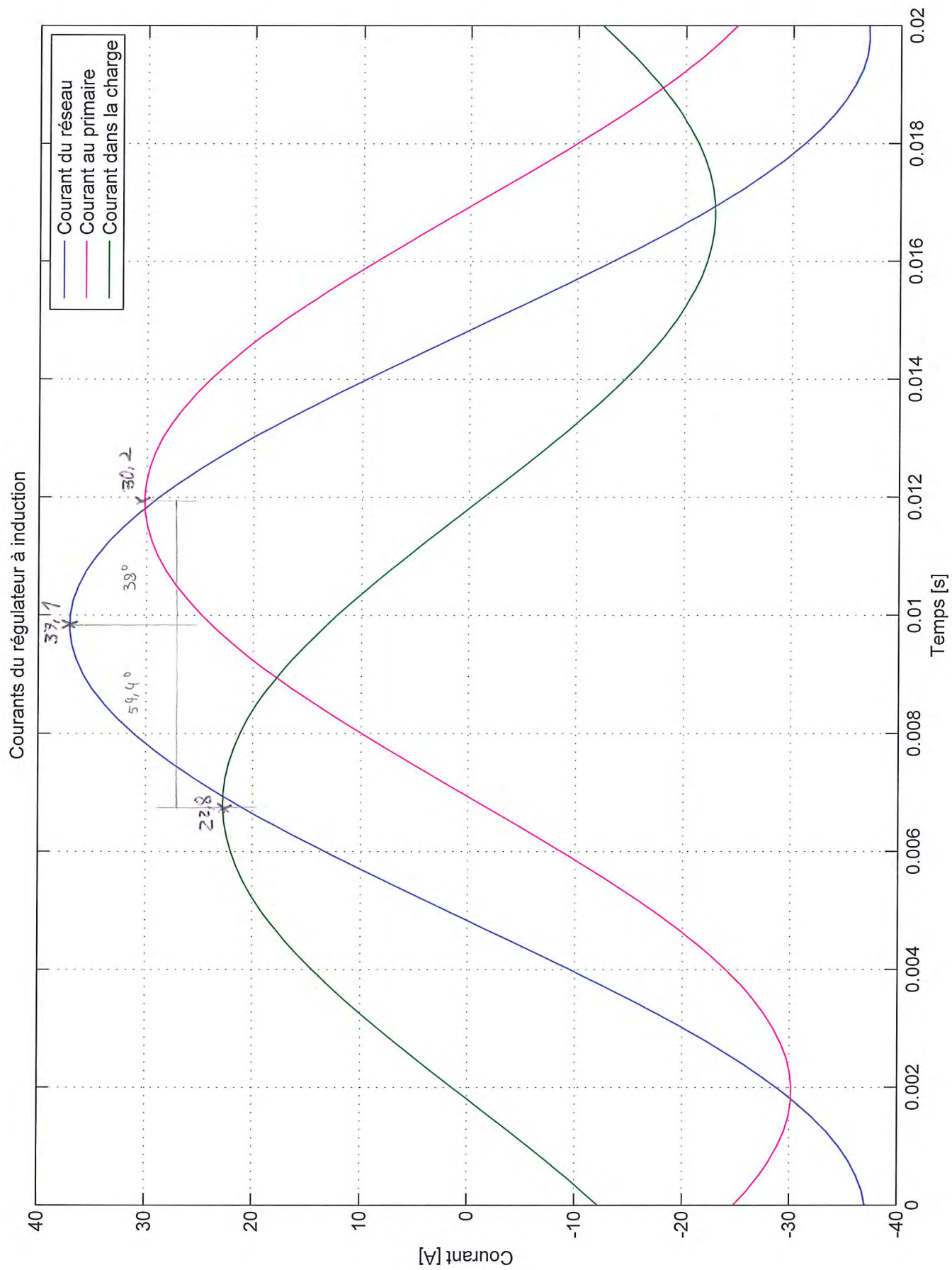
$j 14,32 [\Omega]$, $45,6 [mH]$, $230 [V_{align}]$, $230 [V_{charge}]$, $\alpha_{mec} = 34^\circ$, $\alpha_{electrique} = 68^\circ$

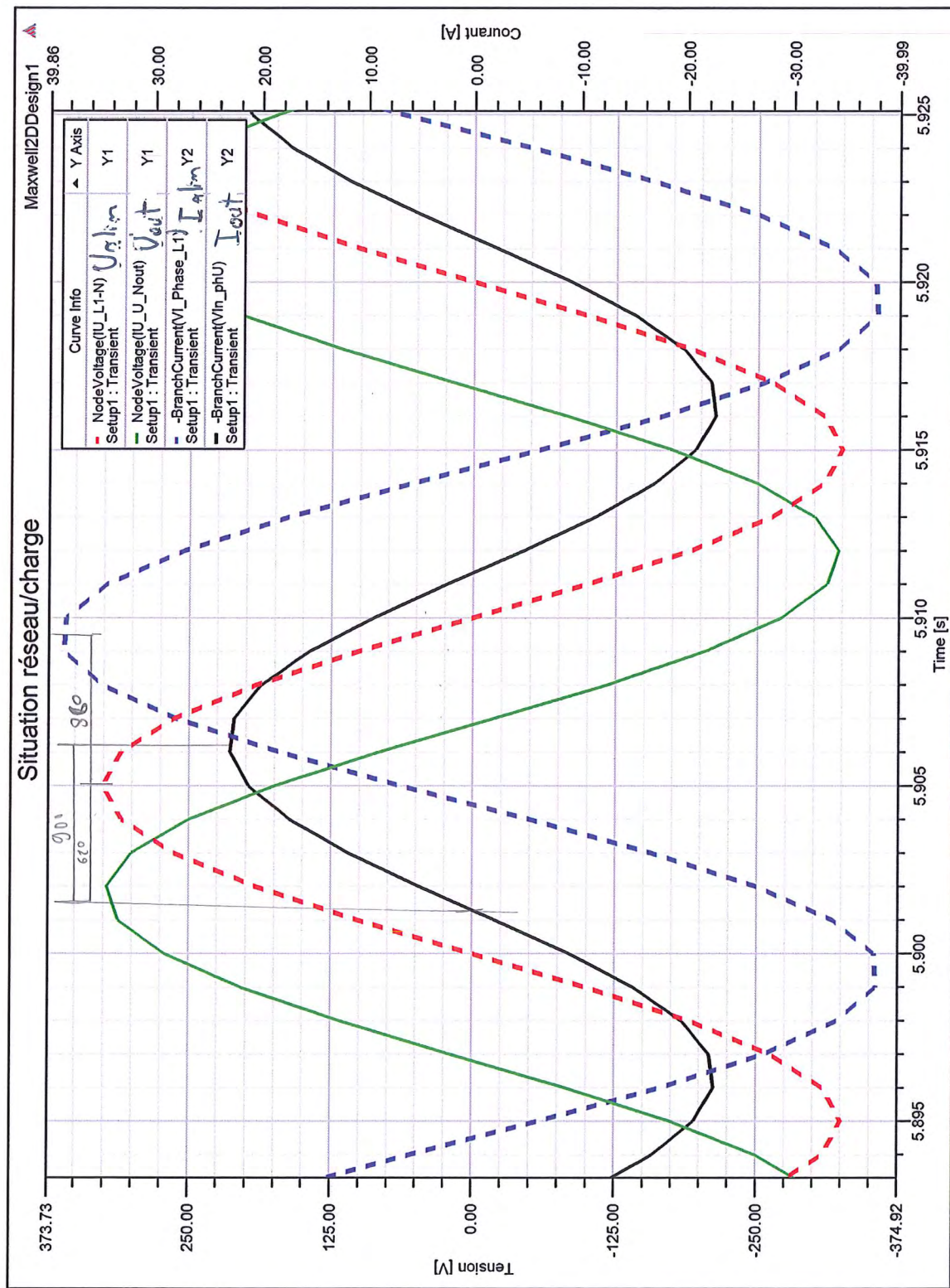
Validation simulation analytique

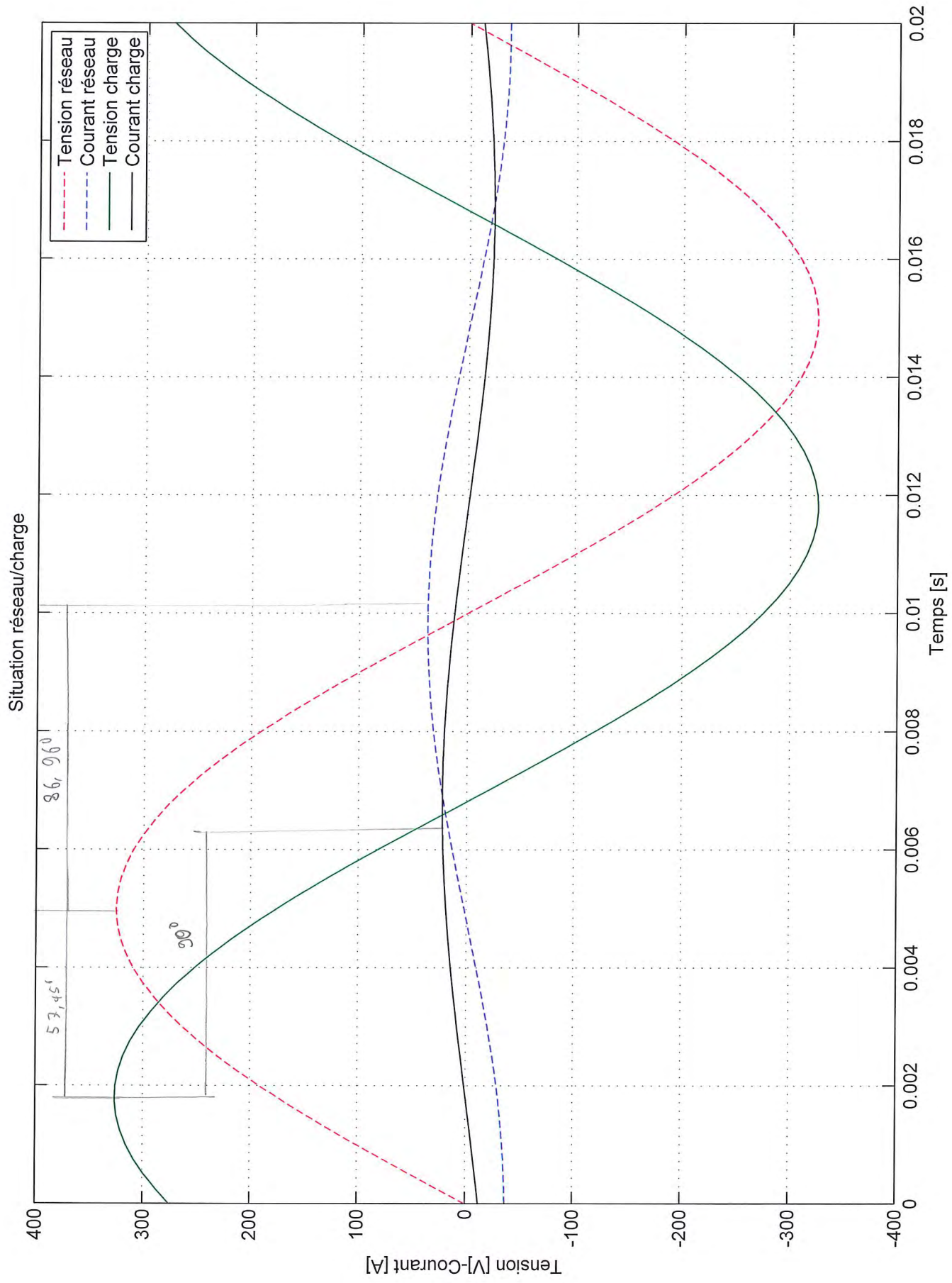
le 29.05.2013











Essai à vide

**Tension de phase d'alimentation 230
[V]**

Position minimale

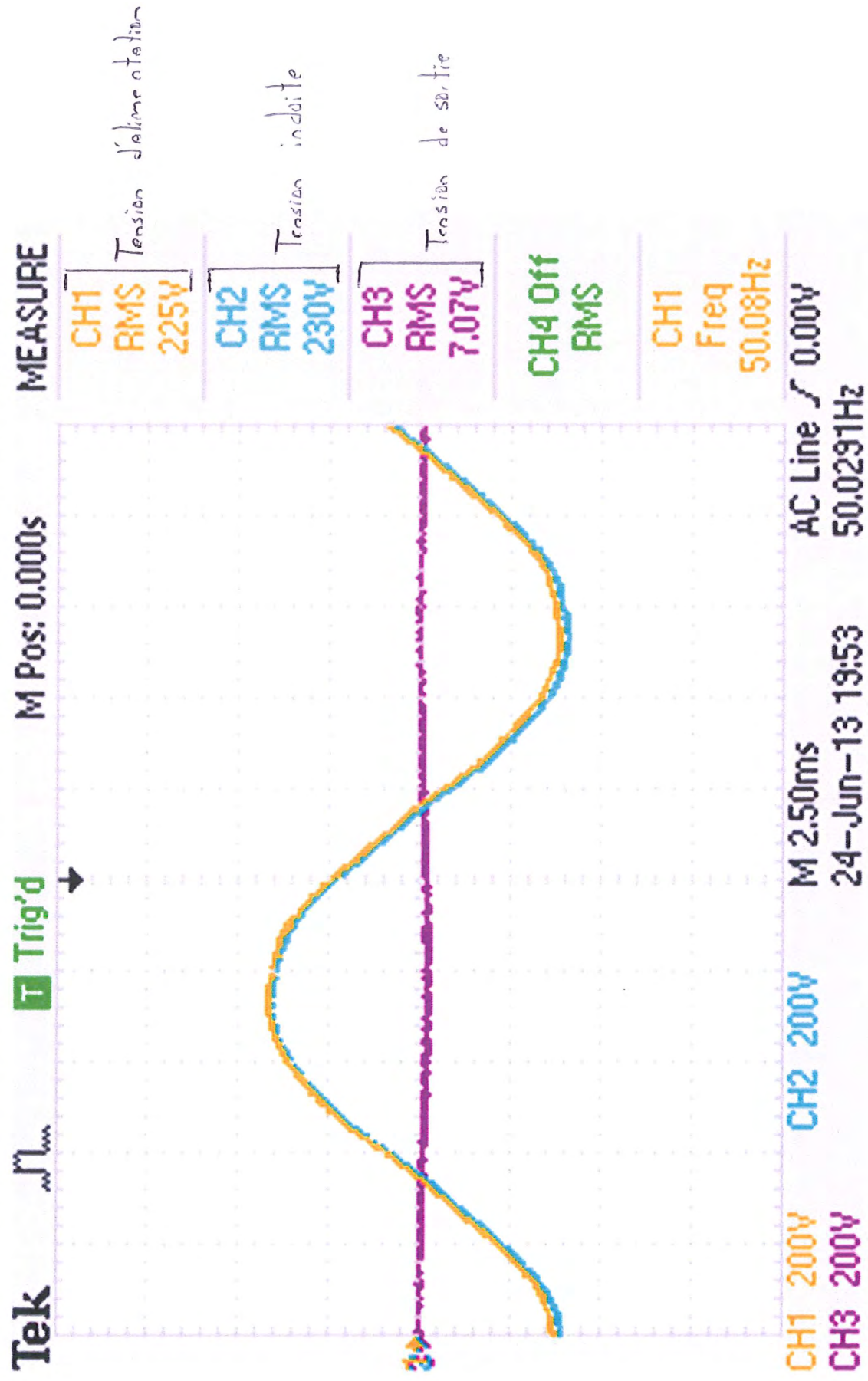
Tensions du régulateur à induction :

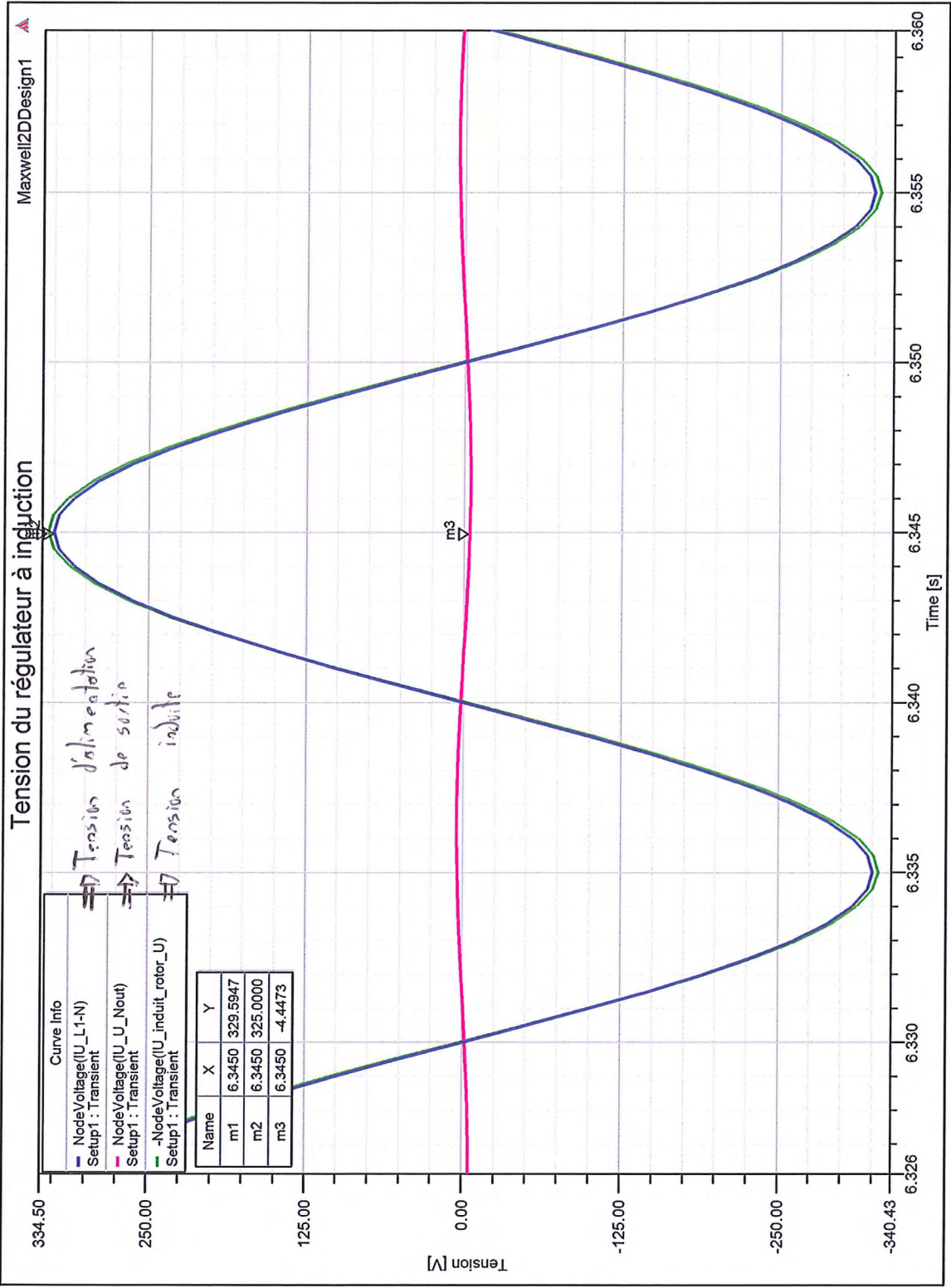
Courbe n° 1 : Mesure

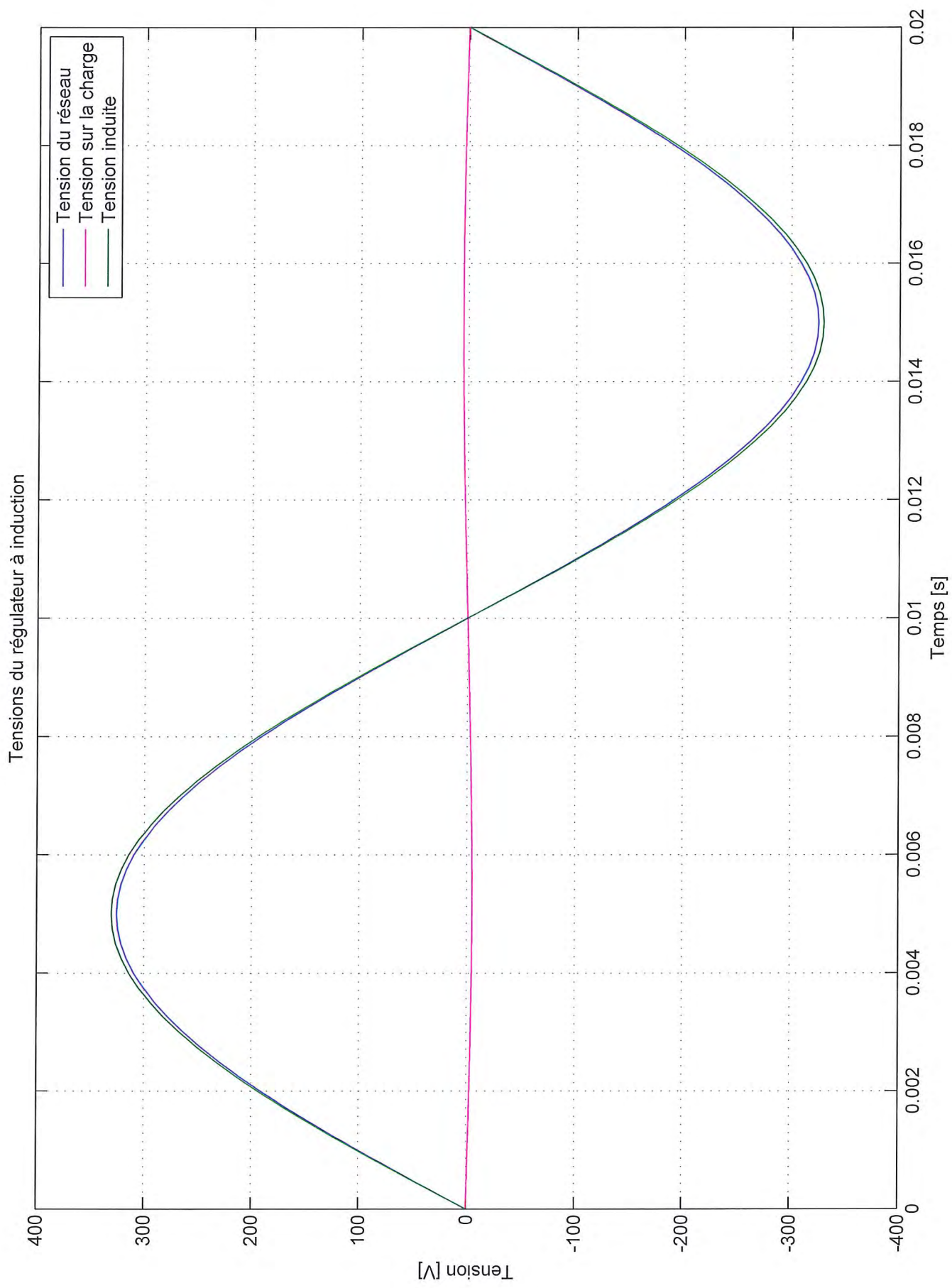
Courbe n° 2 : Simulation par éléments finis

Courbe n° 3 : Modèle analytique

Mesure à vide en position minimale (tension de phase d'alimentation 230 [V]) : Tensions du régulateur à induction







Essai à vide

**Tension de phase d'alimentation 230
[V]**

Position maximale

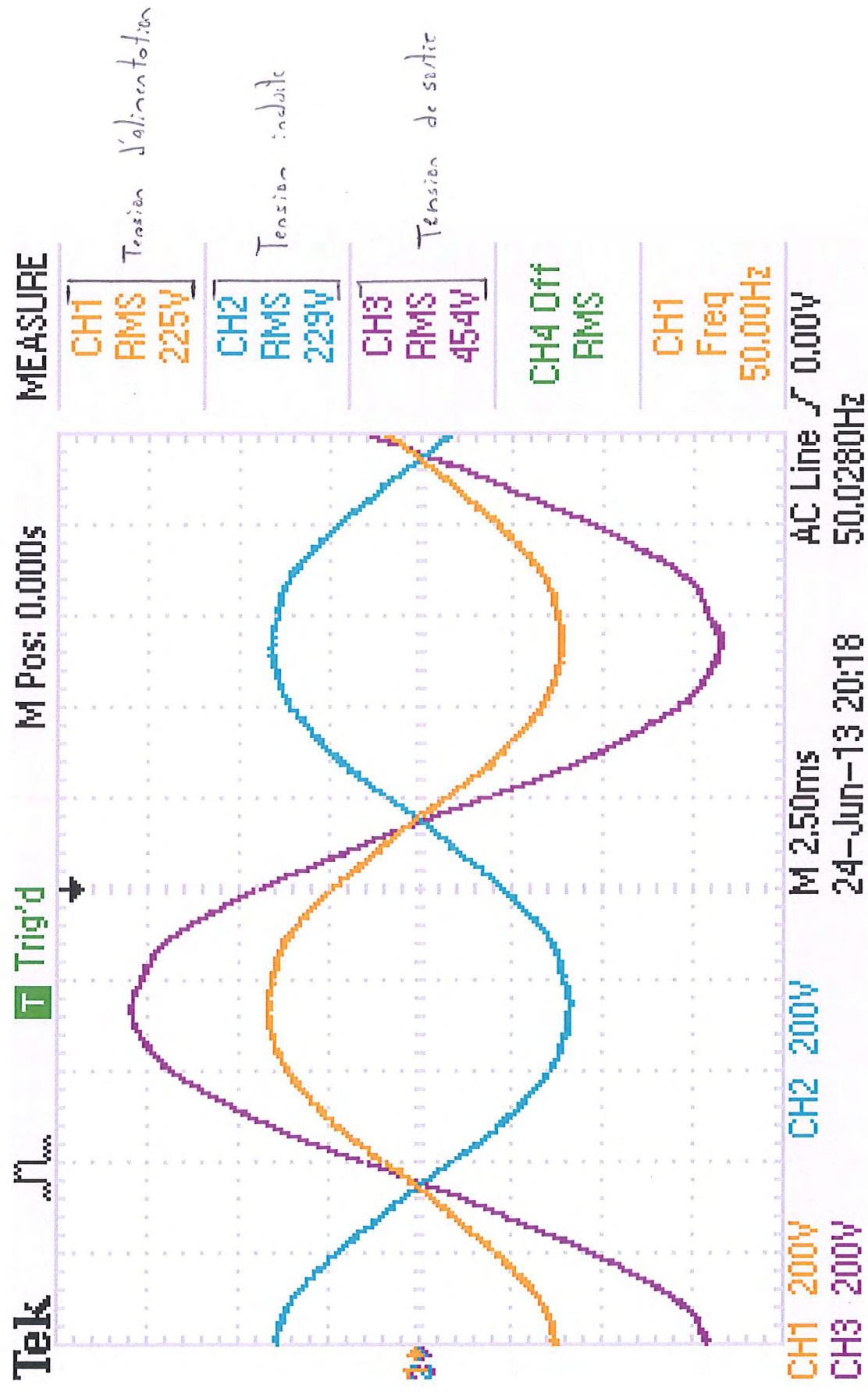
Tensions du régulateur à induction :

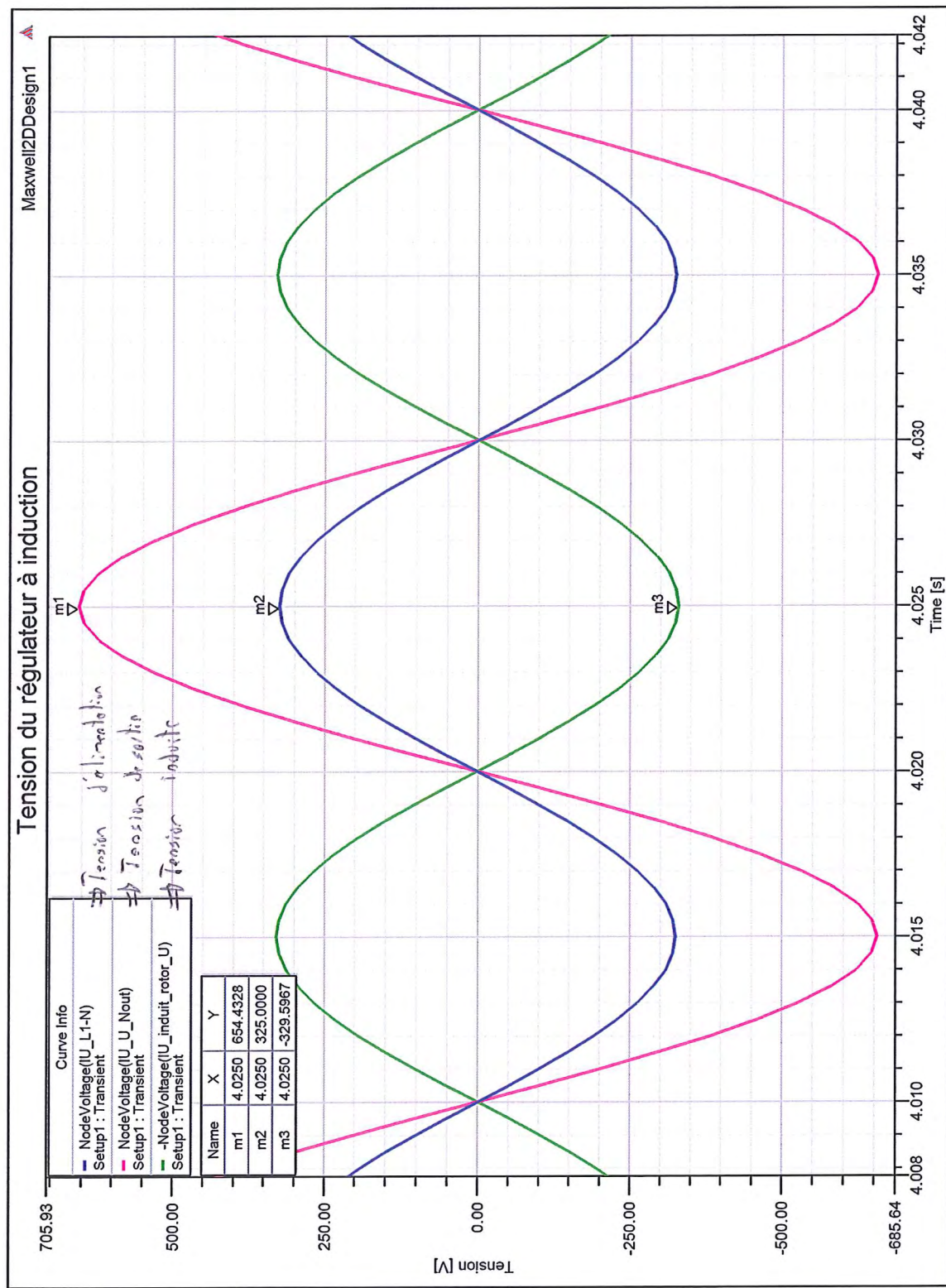
Courbe n° 1 : Mesure

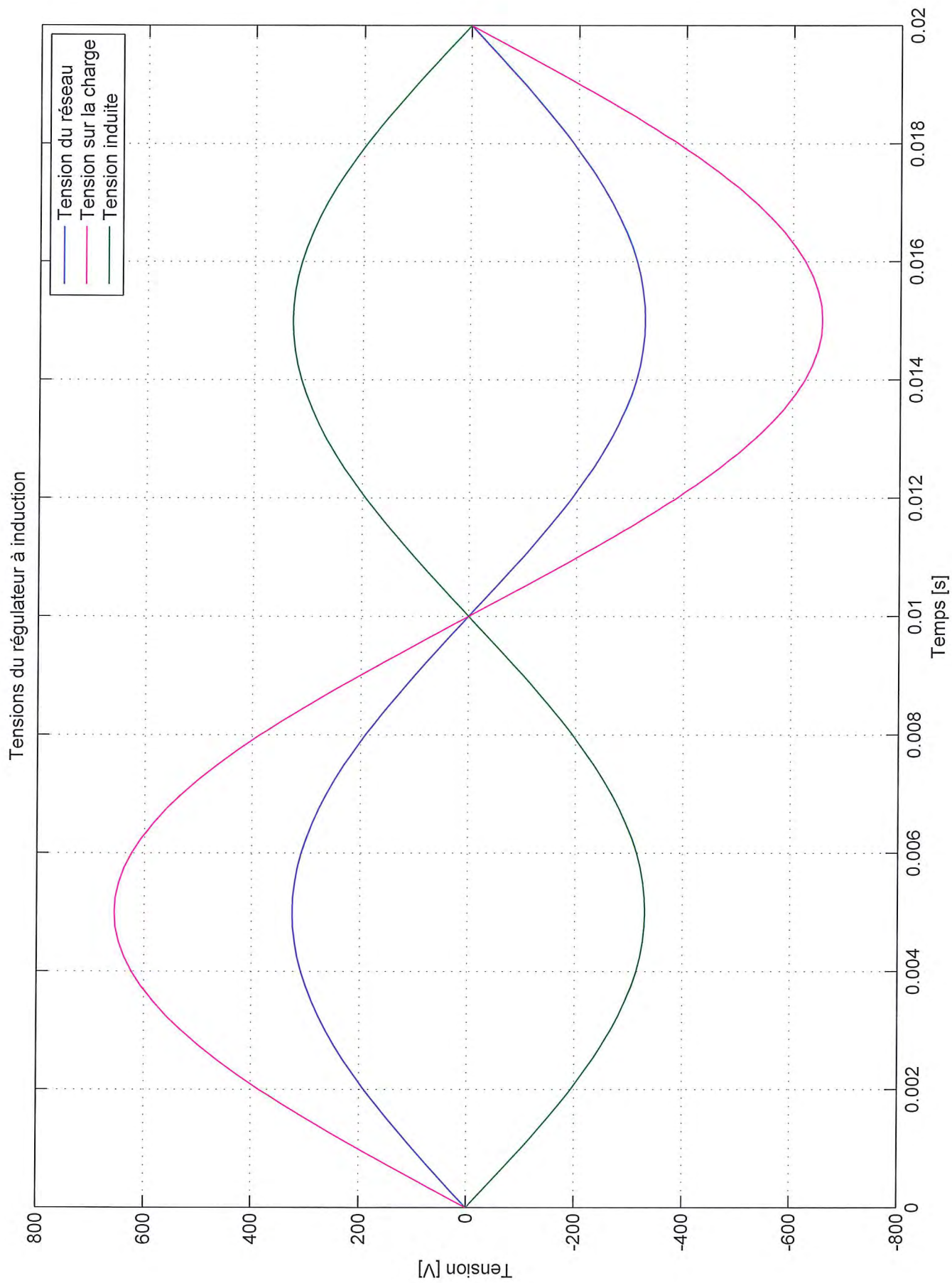
Courbe n° 2 : Simulation par éléments finis

Courbe n° 3 : Modèle analytique

Mesure à vide en position maximale (tension de phase d'alimentation 230 [V]) : Tensions du régulateur à induction







Essai en court-circuit

**Tension de phase d'alimentation 230
[V]**

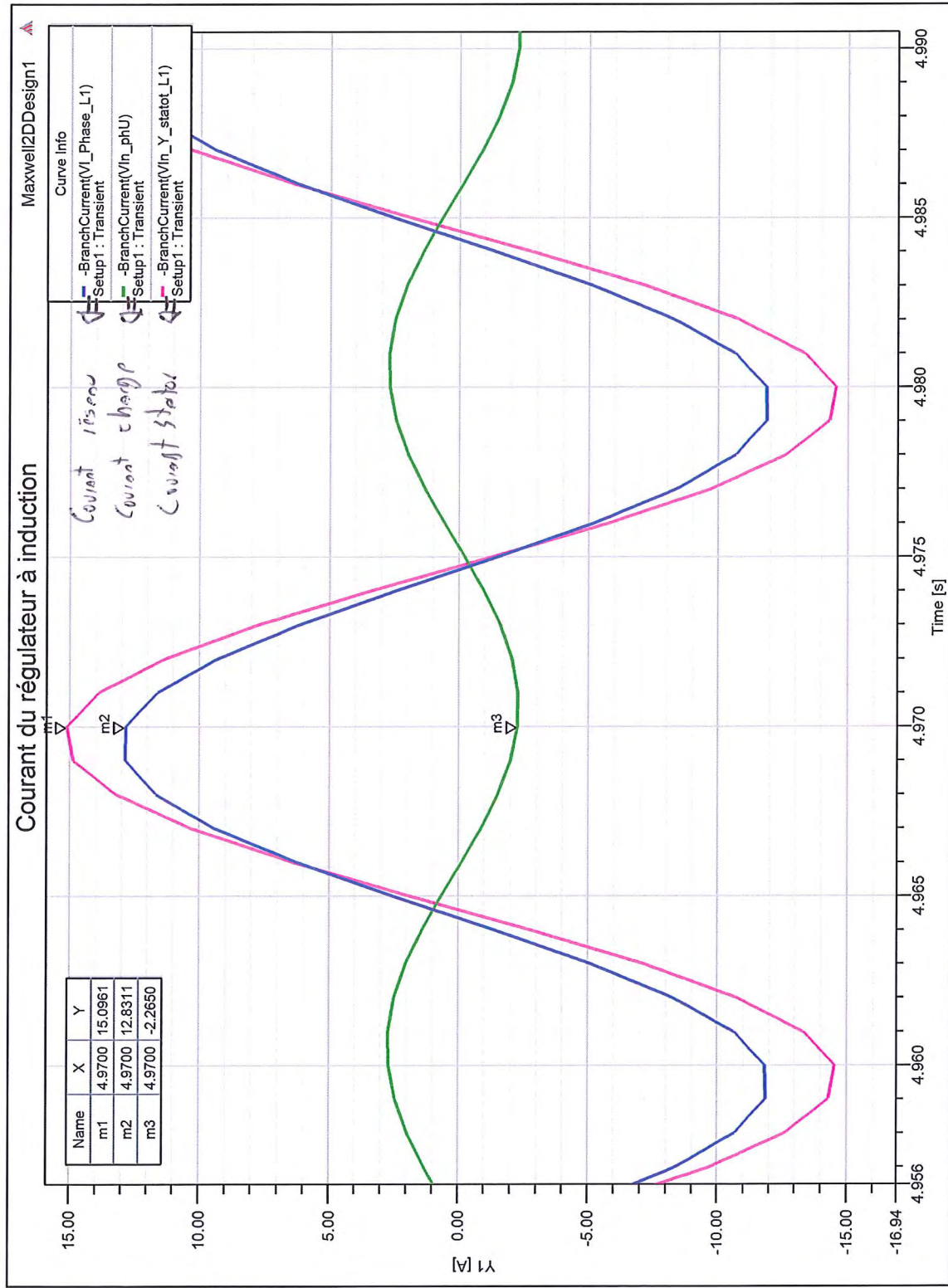
Position minimale

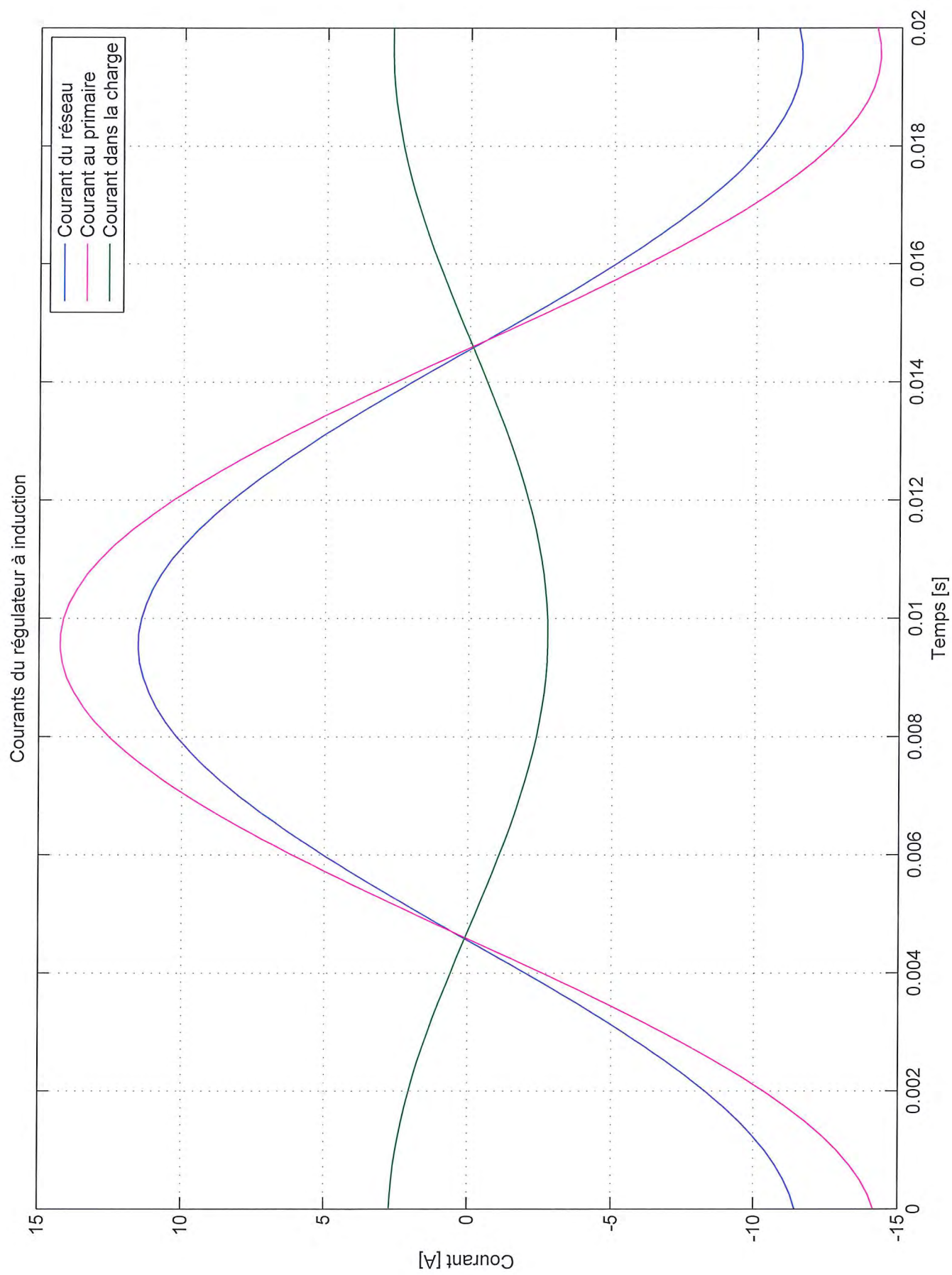
Courants du régulateur à induction :

Courbe n° 1 : Mesure

Courbe n° 2 : Simulation par éléments finis

Courbe n° 3 : Modèle analytique





Essai en court-circuit

Tension de phase d'alimentation 15 [V]

Position maximale

Courants du régulateur à induction :

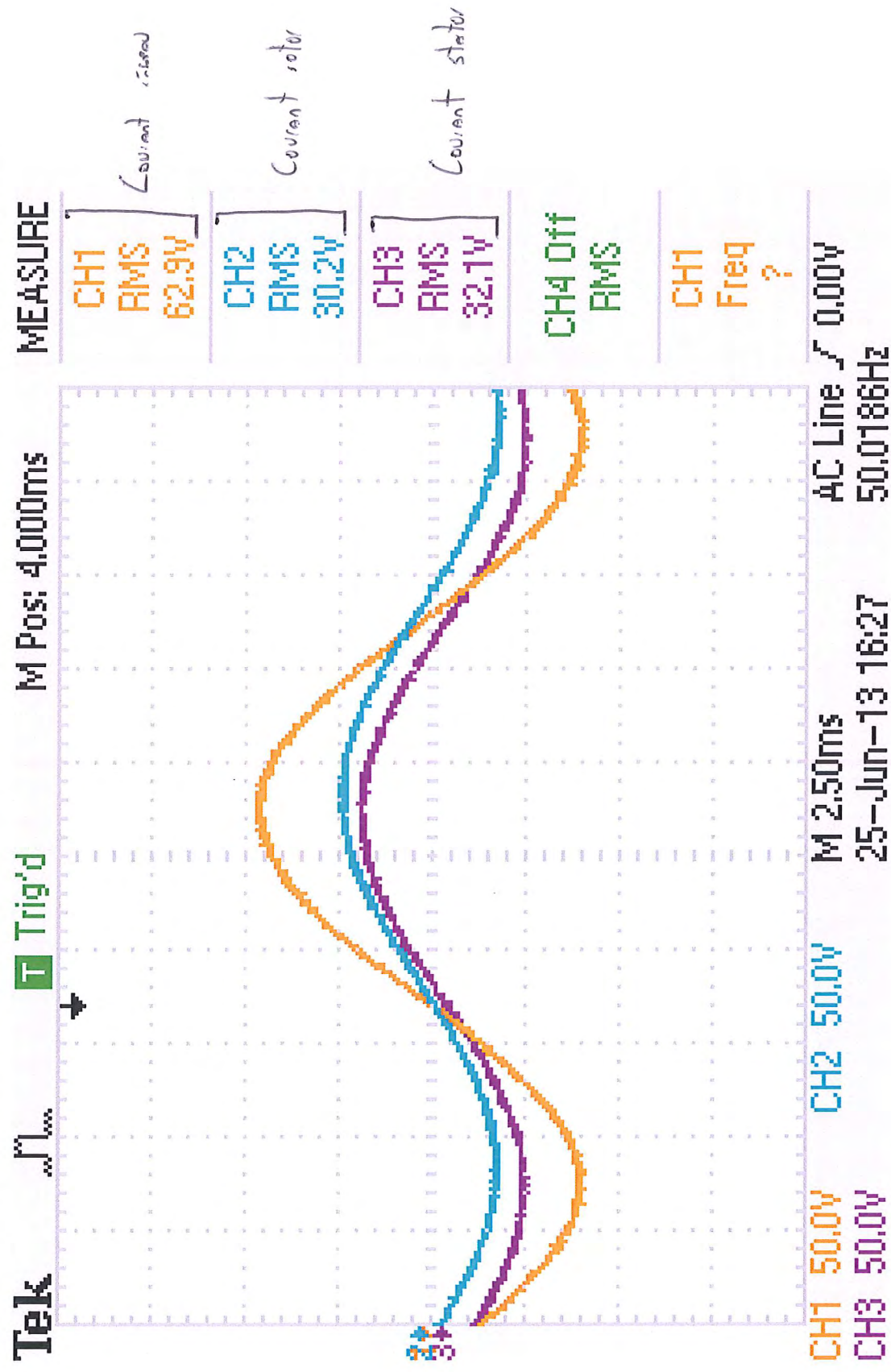
Courbe n° 1 : Mesure

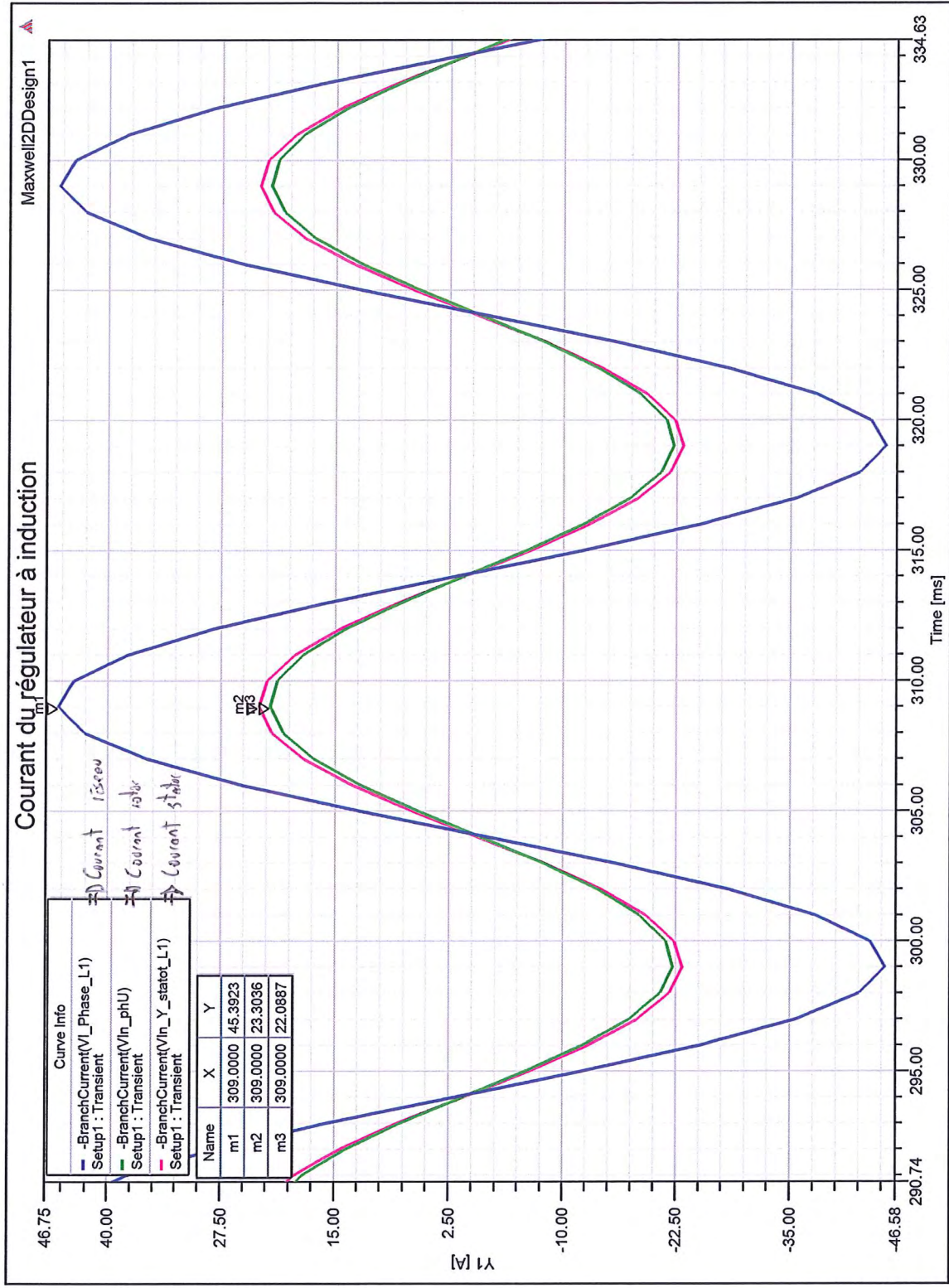
Courbe n° 2 : Simulation par éléments finis

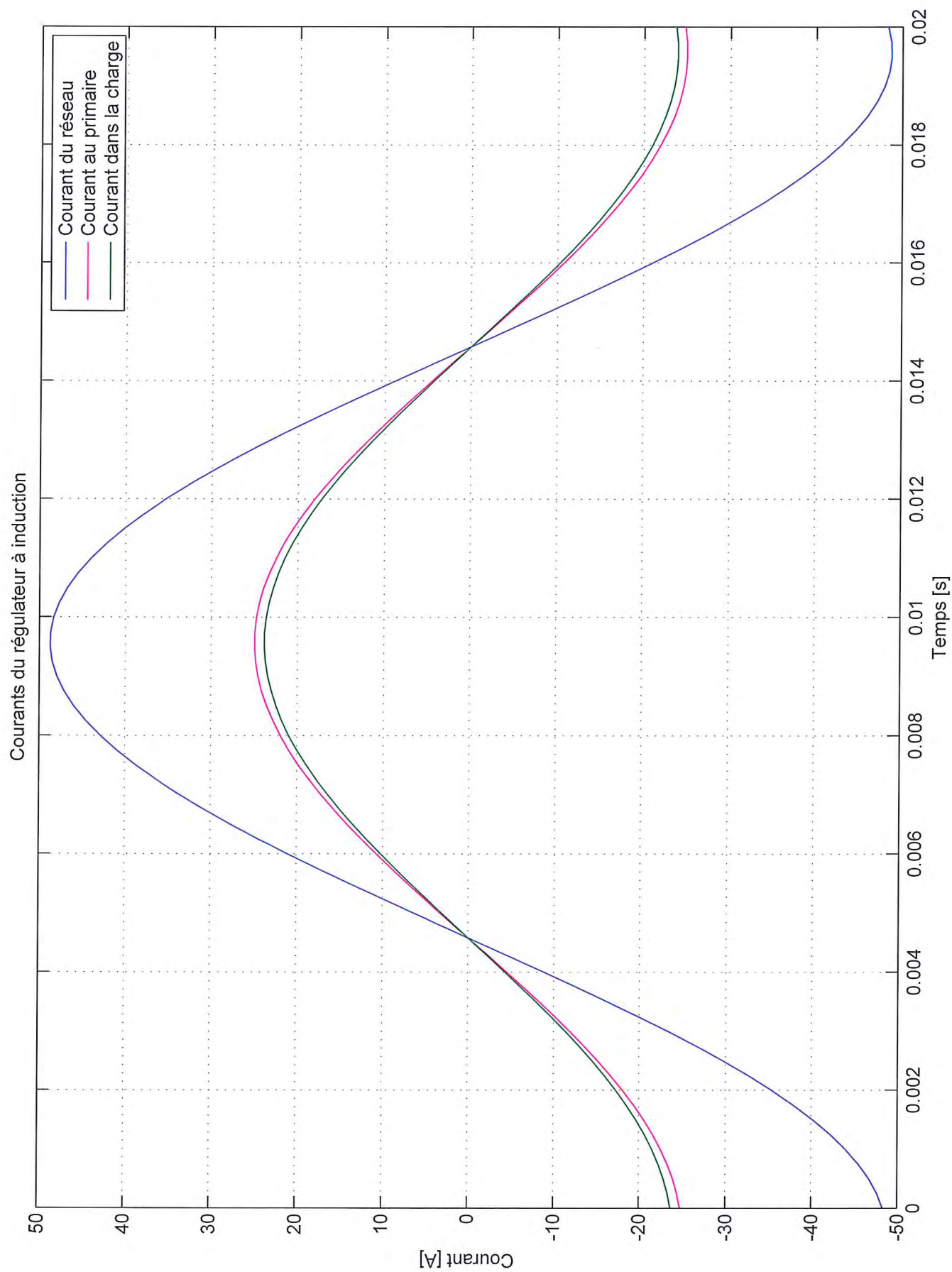
Courbe n° 3 : Modèle analytique

Valeurs : rapport principale tableau N°38

Mesure en court-circuit en position maximale (tension de phase d'alimentation 15 [V]) : Courants du régulateur à induction







Annexe 11

**Fiches techniques des composants pour le
circuit de redressement (diodes,
résistances, condensateurs)**

Diode de redressement Câble M12 1200 V 130 A, SKN130/12, Semikron, Tension inverse de pointe 1200V, Courant direct 130A

SEMIKRON

[Retour à la vue des familles](#)

[Imprimer la page](#)



[Cliquez pour agrandir](#)



Fiches techniques



Fiche technique

ENG

[Avez-vous trouvé une erreur?](#)

[Recommander un produit](#)

Prix par 1 en CHF, TVA incl.

1+	10+	50+
41.47	38.23	34.88

Quantité disponible

UE

No. d'art.

Type

Constructeur

1

[Ajouter au panier](#)

Dans la liste des produits

172 12

[Quantités plus grandes](#)

1 p.

601700

SKN130/12

Semikron

Données techniques:

<input type="checkbox"/>	Tension inverse de pointe	1200V
<input type="checkbox"/>	Courant direct	130A
<input type="checkbox"/>	Courant de choc max. 8/20 µs	2500A
<input type="checkbox"/>	Tension directe	< 1.5V
<input type="checkbox"/>	Type de boîtier	Câble M12
<input type="checkbox"/>	Courant inverse	22mA
<input type="checkbox"/>	RoHS	Conforme RoHS

Information sur la famille

- Les types SK sont adaptés pour le montage des cartes de circuits imprimés
- Les types SKN ont un boîtier ISO métallique avec filotage
- Les types SKa/SKNa sont adaptés aux hautes pointes de tension
- Les types SKR ont la cathode sur le boîtier

Rechercher des produits similaires

Trouvez des produits comparables en sélectionnant les propriétés correspondantes et en cliquant sur le bouton ci-dessous

[Rechercher des produits similaires](#)

© 2012 by Distrelec - Unité de Daetwyler Suisse SA, Grabenstrasse 6, 8606 Naenikon

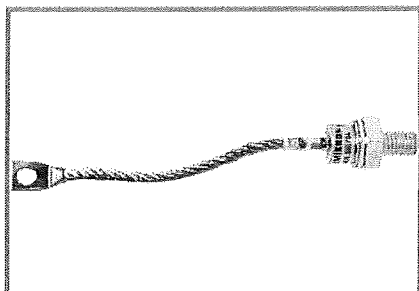
Centrale commandes: +41 44 944 99 22

Support techniques:

+41 44 944 99 50 (Electronique)

+41 44 944 99 65 (Informatique)

SKN 130



Stud Diode

Rectifier Diode

SKN 130

SKR 130

Features

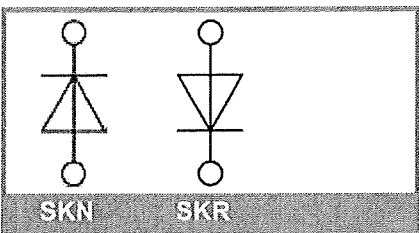
- Reverse voltages up to 1800 V
- Hermetic metal case with glass insulator
- Threaded stud ISO M12 x 1,5 (SKR 130 also 1/2 - 20 UNF or 3/8 - 24 UNF)
- SKN: anode to stud, SKR: cathode to stud

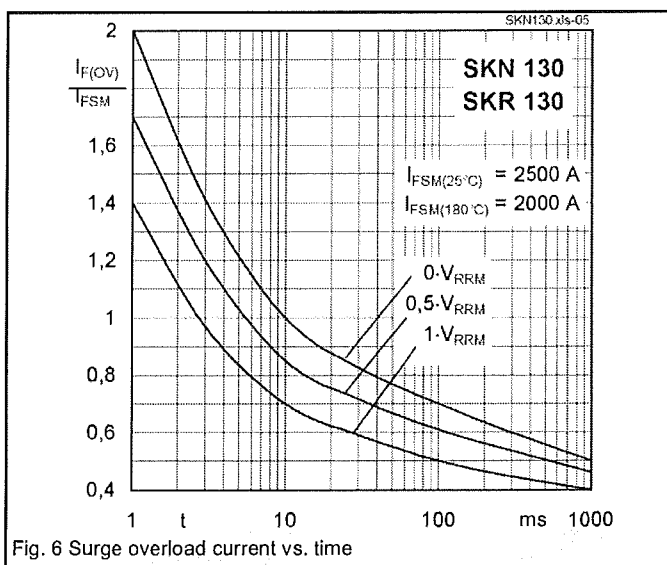
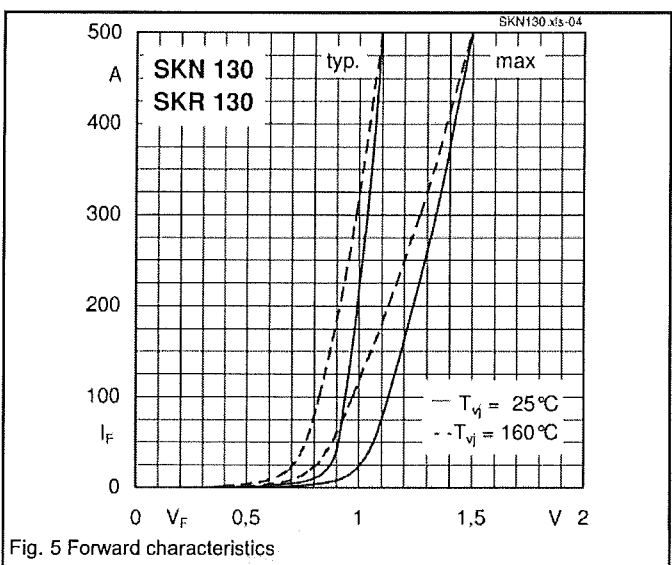
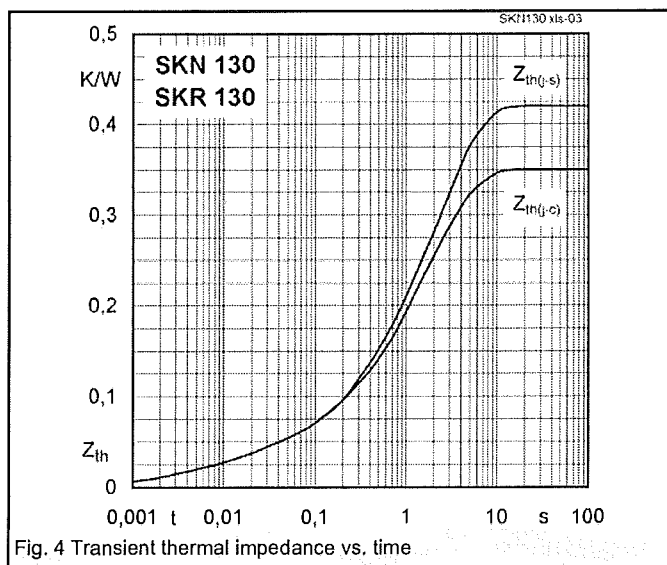
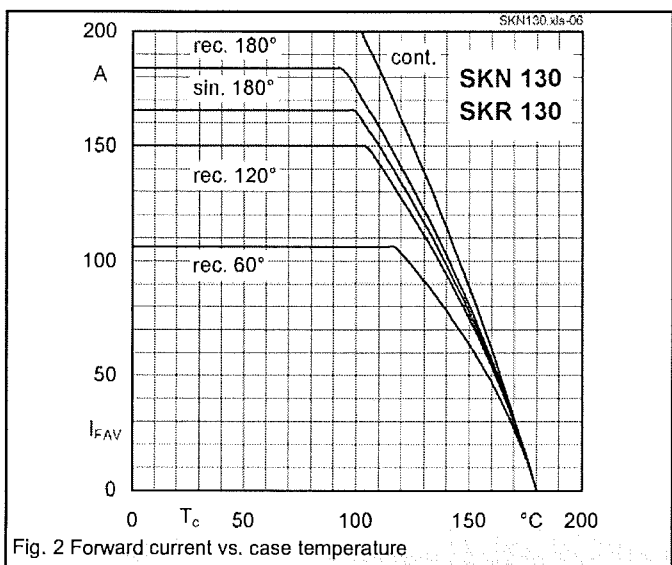
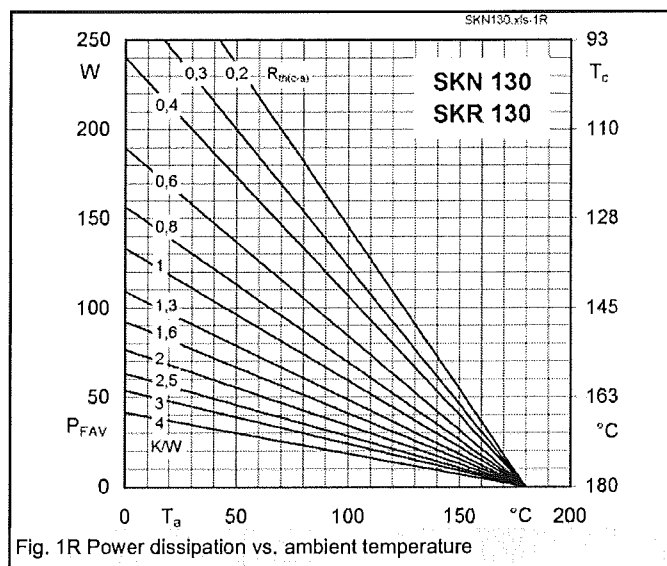
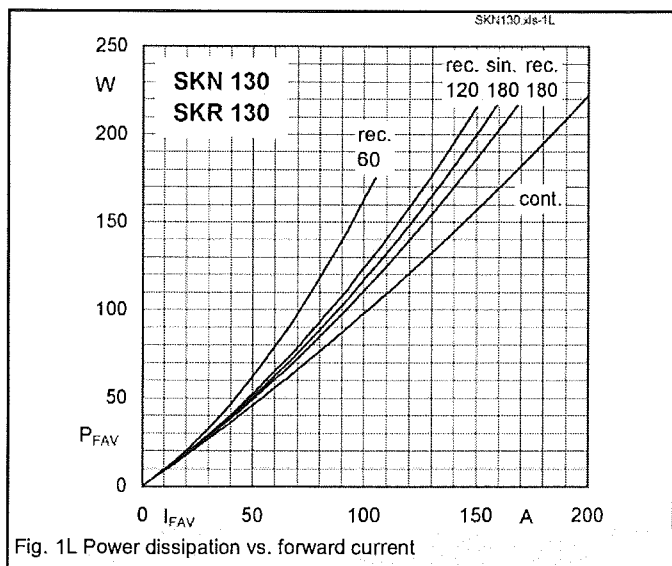
Typical Applications

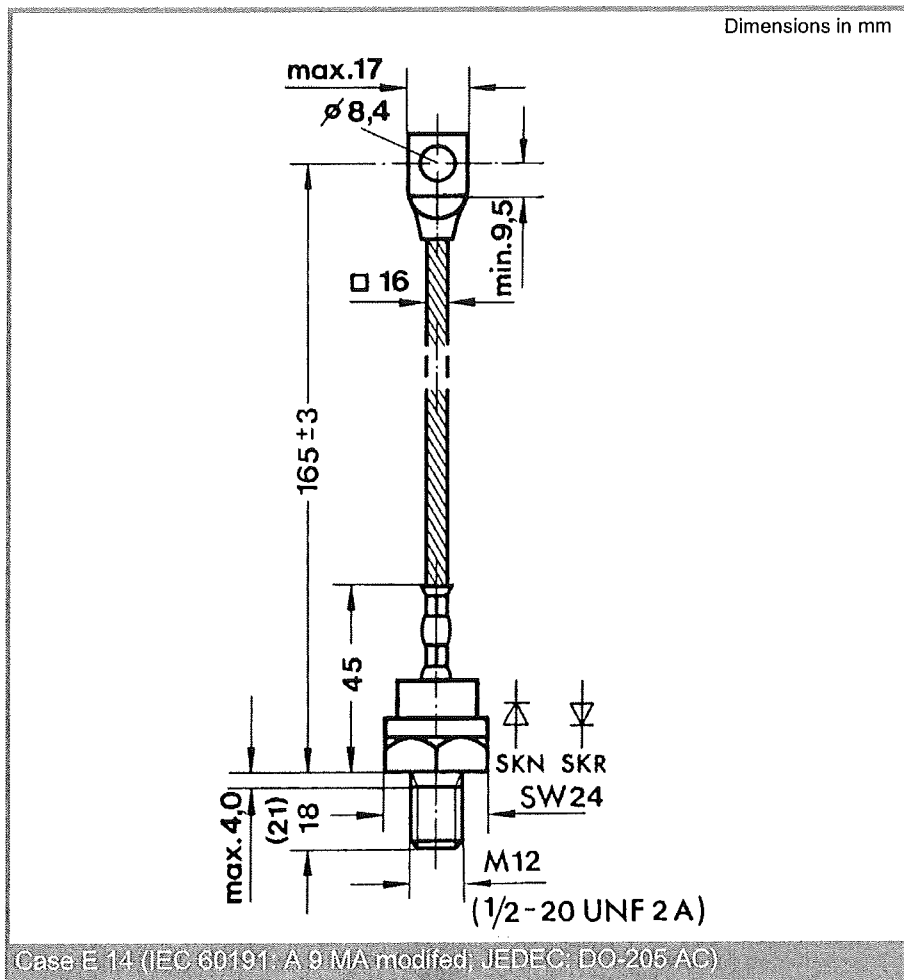
- All-purpose mean power rectifier diodes
- Cooling via heatsinks
- Non-controllable and half-controllable rectifier
- Free-wheeling diodes
- Recommended snubber network:
RC: 0,25 μ F, 50 Ω , ($P_R = 2$ W),
 $R_P = 50$ k Ω ($P_R = 20$ W)

V_{RSM} V	V_{RRM} V	$I_{FRMS} = 260$ A (maximum value for continuous operation) $I_{FAV} = 130$ A (sin. 180; $T_c = 125$ °C)	
400	400	SKN 130/04	SKR 130/04
800	800	SKN 130/08	SKR 130/08
1200	1200	SKN 130/12	SKR 130/12
1400	1400	SKN 130/14	SKR 130/14
1600	1600	SKN 130/16	SKR 130/16
1800	1800	SKN 130/18	SKR 130/18

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{FAV}	sin. 180; $T_c = 100$ °C	165	A
I_D	K 1,1; $T_a = 45$ °C; B2 / B6 K 1,1F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	160 / 225 290 / 405	A
I_{FSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	2500	A
i^2t	$T_{vj} = 180$ °C; 10 ms $T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms $T_{vj} = 180$ °C; 8,3 ... 10 ms	2000 31000 20000	A ² s A ² s
V_F	$T_{vj} = 25$ °C; $I_F = 500$ A	max. 1,5	V
$V_{(TO)}$	$T_{vj} = 180$ °C	max. 0,85	V
r_T	$T_{vj} = 180$ °C	max. 1,3	m Ω
I_{RD}	$T_{vj} = 180$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}$	max. 22	mA
Q_{rr}	$T_{vj} = 160$ °C; $-di_F/dt = 10$ A/ μ s	120	μ C
$R_{th(j-c)}$		0,35	K/W
$R_{th(c-s)}$		0,08	K/W
T_{vj}		- 40 ... + 180	°C
T_{slg}		- 55 ... + 180	°C
V_{isol}		-	V~
M_s	to heatsink	10	Nm
a		5 * 9,81	m/s ²
m	approx.	100	g
Case		E 14	





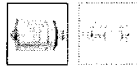


This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

Condensateur de puissance à CA 2.2 uF 1400 VAC , B25835-M225-K7, EPCOS, Capacité 2.2µF , Tension nominale 1400VAC

[Retour à la vue des familles](#) [Imprimer la page](#)

Image illustrative

[Cliquez pour agrandir](#)

Fiches techniques



Fiche technique

ENG

[Avez-vous trouvé une erreur?](#) [Recommander un produit](#)

Prix par 1 en CHF, TVA incl.

1+	5+	10+
110.16	101.41	92.66

Quantité disponible

UE

No. d'art.

Type

Constructeur

1

[Ajouter au panier](#)

Dans la liste des produits

1

[Quantités plus grandes](#)

1 p.

821981

B25835-M225-K7

EPCOS

Données techniques:

<input type="checkbox"/> Capacité	2.2µF
<input type="checkbox"/> Tension nominale	1400VAC
<input type="checkbox"/> Tolérance de capacité	±10%
Connexion	Faston 6.3 x 0.8 mm
Plage de température	-25...+85°C
Goujon de fixation	M12 x 12 mm
ø D	50mm
Longueur	95mm
I ₂	26mm
Catégorie climatique CEI	25/85/56
RoHS	Conforme RoHS

Information sur la famille

- Haute rigidité diélectrique et grande charge en courant de pointe
- Pour l'atténuation et la commutation dans la plage de fréquence moyenne
- Autogénérateur, avec protection contre les arrachages en cas de surpression
- Pour des installations fixes en technique de l'énergie et des autos, pas conforme à la directive RoHS

Rechercher des produits similaires

Trouvez des produits comparables en sélectionnant les propriétés correspondantes et en cliquant sur le bouton ci-dessous

[Rechercher des produits similaires](#)

© 2012 by Distrelec - Unité de Daetwyler Suisse SA, Grabenstrasse 6, 8606 Naenikon

Centrale commandes: +41 44 944 99 22

Support techniques:

+41 44 944 99 50 (Electronique)

+41 44 944 99 65 (Informatique)

MKV AC capacitors

Damping

Ordering code: **B25835**
Date: September 2005

Features

- High dielectric strength
- High peak-current capability

Applications

- Especially suitable for snubber circuits

Construction

- Self-healing
- Plastic dielectric
- Oil-impregnated tubular windings (no PCB)
- Metal-sprayed end faces ensure reliable contacting
- Cylindrical aluminum case
- 1-pole version, ceramic lead-through
- Mounting bolts M8 or M12

Terminals

- Tab connector 6.3 mm

Mounting

- If the vibration stress is $\leq 5\text{ g}$ the bolt is used for mounting.

Grounding

- 1-pole capacitors need not be grounded.

Individual data sheets

Individual data sheets contain detailed specification incl. thermal data.
Upon request, these data sheets are available for each capacitor type.





EPCOS

MKV AC Capacitors

B25835

Damping

Technical data

Standards	IEC 1071-1/2 EN 61071-1/2 VDE 0560 part 120 and 121
Dielectric dissipation factor	$\tan \delta_0$
Capacitance tolerance	$\pm 10\%$
Max. repetitive rate of voltage rise	$(dv/dt)_{\max}$
Max. non-repetitive rate of voltage rise	$(dv/dt)_s$
Climatic data:	
Min. operating temperature	T_{\min}
Max. operating temperature	T_{\max}
Average relative humidity	$\leq 95\%$
Failure quota	300 failures per 10^8 component hours
Load duration	100 000 h
Storage temperature limit	$-55/+85\text{ }^{\circ}\text{C}$
IEC climatic category (IEC 68-1 and 2)	25/085/56
Test data:	
AC test voltage between terminals	V_{TT}
Insulation resistance	R_{ins}
Self-discharge time constant	$\tau = R_{\text{ins}} \times C$
Dissipation factor (50 Hz)	$\tan \delta$



EPCOS

MKV AC Capacitors

B25835

Damping

Characteristics and ordering codes

$C_R^{1)}$ μF	I_{\max} A	\bar{I} A	I_s A	R_s 20 $^{\circ}\text{C}$ m Ω	L_{self} nH	Dimensions $d \times l$ mm	Fig.	Appr. weight g	Ordering code
$V_R = \text{AC } 900 \text{ V}$ $\hat{V} = 1100 \text{ V}$ $V_s = 1500 \text{ V}$ $V_{\text{TT}} = \text{AC } 1150 \text{ V}, 10 \text{ s}$									
0.22	10	90	220	15.0	110	25 × 57	1	40	B25835M6224K007
0.33	10	130	330	11.0	110	25 × 57	1	40	B25835M6334K007
0.47	10	100	250	19.0	110	25 × 57	1	40	B25835M6474K007
0.68	18	150	370	14.0	110	30 × 57	1	50	B25835M6684K007
1.00	18	220	550	10.0	110	30 × 57	1	50	B25835M6105K007
2.20	18	480	1200	6.6	110	45 × 57	1	110	B25835M6225K007
4.70	18	1000	2500	4.6	110	60 × 57	1	190	B25835M6475K007
$V_R = \text{AC } 1400 \text{ V}$ $\hat{V} = 1800 \text{ V}$ $V_s = 2400 \text{ V}$ $V_{\text{TT}} = \text{AC } 1800 \text{ V}, 10 \text{ s}$									
0.10	10	150	380	20.0	110	25 × 57	2	40	B25835M0104K007
0.22	10	220	550	18.0	140	25 × 70	1	50	B25835M0224K007
0.33	10	200	500	27.0	190	25 × 95	1	60	B25835M0334K007
0.47	18	280	700	20.0	190	30 × 95	1	90	B25835M0474K007
0.68	18	400	1000	15.0	190	30 × 95	1	90	B25835M0684K007
1.00	18	600	1500	12.0	190	35 × 95	1	110	B25835M0105K007
2.20	18	1300	3300	7.6	190	50 × 95	1	220	B25835M0225K007
$V_R = \text{AC } 1700 \text{ V}$ $\hat{V} = 2100 \text{ V}$ $V_s = 2900 \text{ V}$ $V_{\text{TT}} = \text{AC } 2100 \text{ V}, 10 \text{ s}$									
0.10	10	200	500	16.0	110	25 × 57	2	40	B25835M7104K007
0.22	10	300	750	15.0	140	25 × 70	1	50	B25835M7224K007
0.47	18	660	1600	8.4	140	35 × 70	1	90	B25835M7474K007

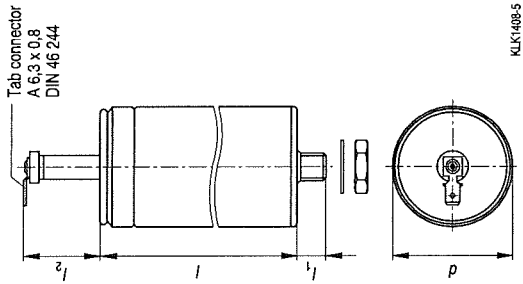
1) Other capacitance values upon request

Characteristics and ordering codes

$C_R^{1)}$ μF	I_{max} A	\hat{I} A	I_s A	R_s 20 °C mΩ	L_{self} nH	Dimensions d x l mm	Fig.	Appr. weight g	Ordering code
$V_R = AC 2100 V$									
$\hat{V} = 2600 V$ $V_s = 3600 V$ $V_{TT} = AC 2600 V, 10 s$									
0.47	18	750	1900	11.0	190	35 x 95	2	110	B25835M1474K007
0.68	18	1100	2700	8.7	190	40 x 95	1	140	B25835M1684K007
1.00	18	1600	4000	7.1	190	45 x 95	1	180	B25835M1105K007
2.20	18	1100	2800	13.0	250	60 x 131	1	440	B25835M1225K007
$V_R = AC 3400 V$									
$\hat{V} = 4300 V$ $V_s = 5800 V$ $V_{TT} = AC 4300 V, 10 s$									
0.10	18	280	700	33.0	250	35 x 131	1	150	B25835M2104K007
0.15	18	400	1000	24.0	250	35 x 131	1	150	B25835M2154K007
0.22	18	600	1500	18.0	250	35 x 131	1	150	B25835M2224K007
0.33	18	900	2300	15.0	250	50 x 131	1	300	B25835M2334K007
0.47	18	1300	3300	12.0	250	50 x 131	1	300	B25835M2474K007
0.68	18	1900	4800	11.0	250	60 x 131	1	440	B25835M2684K007

1) Other capacitance values upon request

Dimensional drawing



$d_{+0.5/-0.2}$ mm	l_{-1} mm	$l_1 + 1^*)$ mm	l_{2max} mm	Creepage distance mm	Clear- ance mm
25	57	8	15	6	6
25	57	8	23	14	14
25	70	8	23	14	14
25	95	8	23	14	14
30	57	8	15	6	6
30	95	8	23	14	14
35	70	8	26	14	14
35	95	8	26	14	14
35	131	8	32	20	20
40	95	8	32	20	20
45	57	8	22	10	10
45	95	8	32	20	20
50	95	12	26	14	14
50	131	12	32	20	20
60	57	12	22	10	10
60	131	12	32	20	20

*) 8 mm = threaded bolt M8
12 mm = threaded bolt M12

Mounting parts (included in delivery)

Threaded bolt	Max. torque	Washer	Hex nut
M8	4 Nm	A 8.4 DIN 125-Ms	M 8 DIN 439
M12	10 Nm	A 13 DIN 125-Ms	M12 DIN 439

Damping

Cautions and warnings

Safety

- In case of dents of more than 1 mm depth or any other mechanical damage, capacitors must not be used at all. This applies also in cases of oil leakage.
- Electrical or mechanical misapplication of capacitors may be hazardous. Personal injury or property damage may result from bursting of the capacitor or from expulsion of oil or melted material due to mechanical disruption of the capacitor.
- Ensure good, effective grounding for capacitor enclosures.
- Observe appropriate safety precautions during operation (self-recharging phenomena and the high energy contained in capacitors).
- Handle capacitors carefully, because they may still be charged even after disconnection.
- The terminals of capacitors, connected bus bars and cables as well as other devices may also be energized.
- Follow good engineering practice.
- Failure to follow cautions may result, worst case, in premature failures, bursting and fire.

Thermal load

After installation of the capacitor it is necessary to verify that maximum hot-spot temperature is not exceeded at extreme service conditions (see www.epcos.com/thermal_design).

Mechanical protection

The capacitor has to be installed in a way that mechanical damages and dents in the aluminum can are avoided.

Storage and operating conditions

Do not use or store capacitors in corrosive atmosphere especially where chloride gas, sulfide gas, acid, alkali, salt or the like are present. In dusty environments, regular maintenance and cleaning especially of the terminals is required to avoid conductive path between phases and/or phases and ground.

Overpressure disconnector

To ensure full functionality of an overpressure disconnector, the following must be observed:

- The elastic elements must not be hindered, i.e.
 - connecting lines must be flexible leads (cables),
 - there must be sufficient space (minimum 12 mm) above the connections for expansion of the overpressure disconnector,
 - folding crimps must not be retained by clamps.
- Stress parameters of the capacitor must be within the IEC61071 specification.

Service life expectancy

Electrical components do not have an unlimited service life expectancy; this applies to self-healing capacitors too. The maximum service life expectancy may vary depending on the application the capacitor is used in.

The following applies to all products named in this publication:

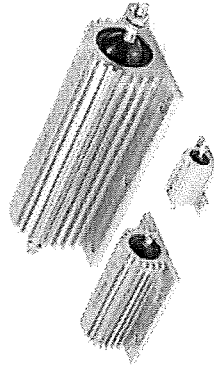
1. Some parts of this publication contain **statements about the suitability of our products for certain areas of application**. These statements are based on our knowledge of typical requirements that are often placed on our products in the areas of application concerned. We nevertheless expressly point out that **such statements cannot be regarded as binding statements about the suitability of our products for a particular customer application**. As a rule, EPCOS is either unfamiliar with individual customer applications or less familiar with them than the customers themselves. For these reasons, it is always ultimately incumbent on the customer to check and decide whether an EPCOS product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular customer application.
2. We also point out that **in individual cases, a malfunction of passive electronic components or failure before the end of their usual service life cannot be completely ruled out in the current state of the art, even if they are operated as specified**. In customer applications requiring a very high level of operational safety and especially in customer applications in which the malfunction or failure of a passive electronic component could endanger human life or health (e.g. in accident prevention or life-saving systems), it must therefore be ensured by means of suitable design of the customer application or other action taken by the customer (e.g. installation of protective circuitry or redundancy) that no injury or damage is sustained by third parties in the event of malfunction or failure of a passive electronic component.
3. **The warnings, cautions and product-specific notes must be observed.**
4. In order to satisfy certain technical requirements, **some of the products described in this publication may contain substances subject to restrictions in certain jurisdictions (e.g. because they are classified as "hazardous")**. Useful information on this will be found in our Material Data Sheets on the Internet (www.epcos.com/material). Should you have any more detailed questions, please contact our sales offices.
5. We constantly strive to improve our products. Consequently, **the products described in this publication may change from time to time**. The same is true of the corresponding product specifications. Please check therefore to what extent product descriptions and specifications contained in this publication are still applicable before or when you place an order.
- We also **reserve the right to discontinue production and delivery of products**. Consequently, we cannot guarantee that all products named in this publication will always be available.
6. Unless otherwise agreed in individual contracts, **all orders are subject to the current version of the "General Terms of Delivery for Products and Services in the Electrical Industry" published by the German Electrical and Electronics Industry Association (ZVEI)**.
7. The trade names EPCOS, CeraDiode, CSSP, PhaseCap, SilverMod, SIFI, SIMID, SIKOREL, SIOV, SIP5D, SIP5K, TOPcap, UltraCap, WindCap are **trademarks registered or pending** in Europe and in other countries. Further information will be found on the Internet at www.epcos.com/trademarks.

HS Aluminium Housed Resistors



Manufactured in line with the requirements of MIL 18546 and IEC 115, designed for direct heatsink mounting with thermal compound to achieve maximum performance.

- High Power to volume
- Wound to maximise High Pulse Capability
- Values from R005 to 100K
- Custom designs welcome
- RoHS Compliant



Characteristics

Tolerance (Code):
Standard $\pm 5\%$ (J) and $\pm 10\%$ (K). Also available $\pm 1\%$ (F), $\pm 2\%$ (G) and $\pm 3\%$ (H)

Tolerance for low Ω values:
Typically $\pm R05 \pm 5\%$, $\pm R047 \pm 10\%$

Temperature coefficients:
Typical values $< 1K$ 100ppm Std. $> 1K$ 25ppm Std. For lower TCR's please contact Arcol

Insulation resistance (Dry):
10,000 M Ω minimum

Power dissipation:
At high ambient temperature dissipation derates linearly to zero at 200°C

Ohmic values:
From R005 to 100K depending on wattage size

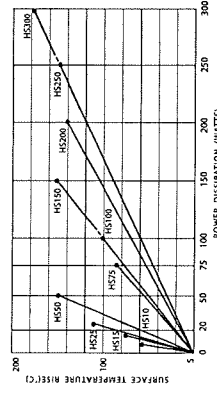
Low inductive (NHS):
Specify by adding N before HS Series code, e.g. NHS50

NHS ohmic value:
Divide standard HS maximum value by 4

NHS working volts:
Divide standard HS maximum working voltage by 1,414

Temp. Rise & Power Dissipation

Surface temperature of resistor related to power dissipation. The resistor is standard heatsink mounted using a proprietary heatsink compound.



Heat Dissipation

Heat dissipation: Whilst the use of proprietary heat sinks with lower thermal resistances is acceptable, uprating is not recommended. For maximum heat transfer it is recommended that a heat sink compound be applied between the resistor base and heat sink chassis mounting surface. It is essential that the maximum hot spot temperature of 200°C is not exceeded, therefore, the resistor must be mounted on a heat sink of correct thermal resistance for the power being dissipated.

Ordering Procedure

Standard Resistor: To specify standard Series, Watts, Ohmic Value, Tolerance Code, e.g.: HS25 2R2 J

Non-Inductive Resistor: To specify add N, e.g.: NHS100 10R J

ARCOL UK Limited,
Three Milestone Ind. Estate,
Trove, Cornwall, TR4 9LG, UK.
T +44 (0) 1872 277431
F +44 (0) 1872 222092
E sales@arcolresistors.com

www.arcolresistors.com

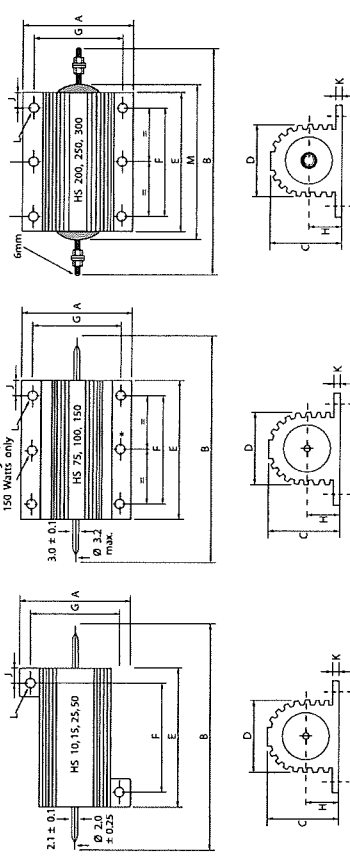
HS Aluminium Housed Resistors



Electrical Specifications

Size	Style MIL-R 18546	Power rating on std. heatsink @25°C	Resistance range	Limiting element voltage	Voltage proof AC rms	Approx weight gms	Typical surface rise HS mounted	Standard heatsink AreaCM ²	Thick-
HS10	RE 60	10	R005-10K	160	1400	4	5.8	415	1
HS15	RE 65	15	R005-10K	265	1400	7	5.1	415	1
HS25	RE 70	25	R005-36K	550	3500	14	4.2	535	1
HS50	RE 75	50	R01-64K	1250	3500	32	3.0	535	1
HS75		75	R01-50K	1400	6363	85	1.1	995	3
HS100		100	R01-70K	1900	6363	115	1.0	995	3
HS150		150	R01-100K	2500	6363	175	1.0	995	3
HS200		200	R01-50K	1900	7070	5000	0.7	3750	3
HS250		250	R01-50K	2200	7070	5000	0.6	4765	3
HS300		300	R01-68K	2500	7070	700	0.6	5780	3

HS10-HS300 Standard Resistor



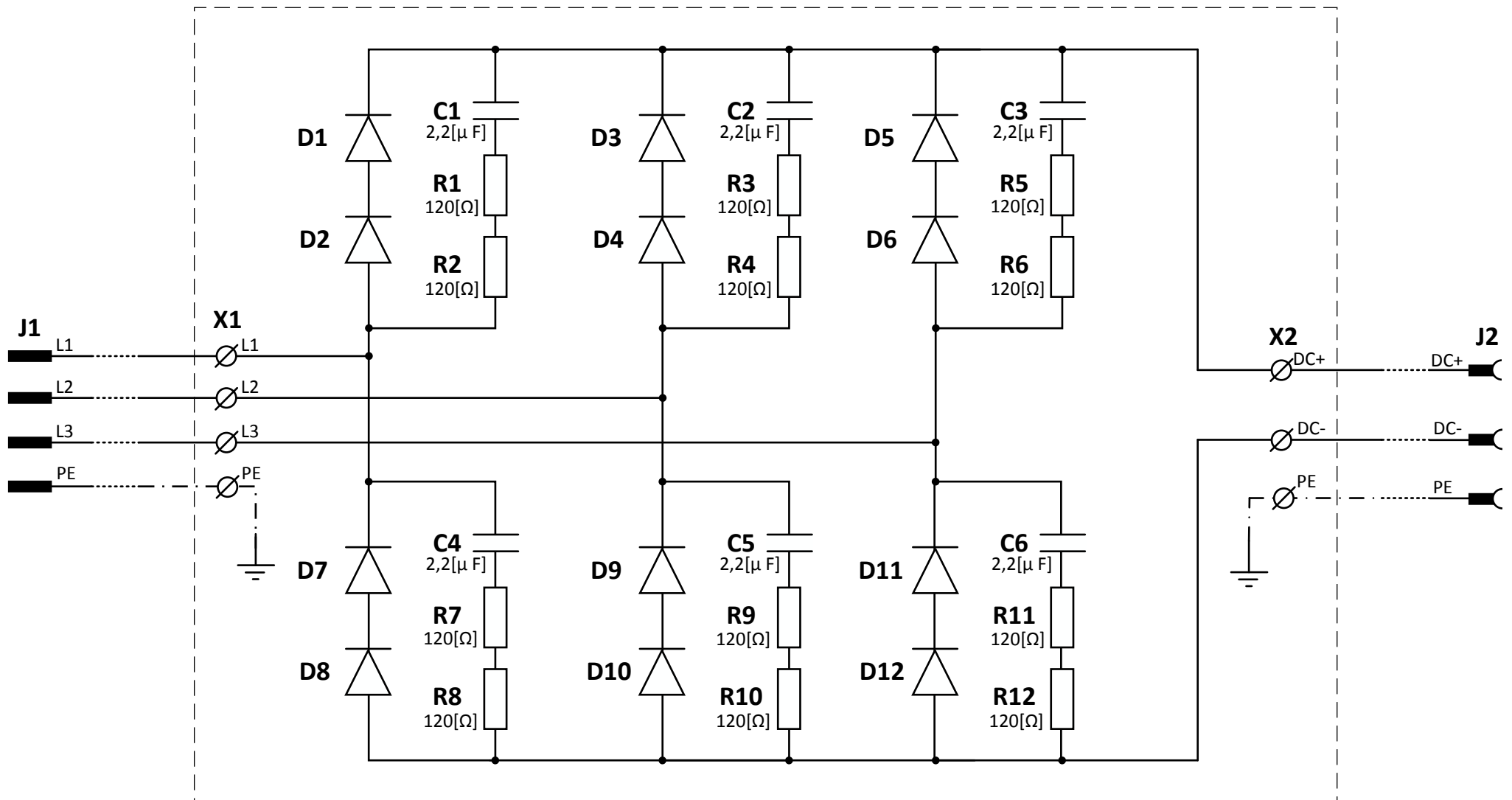
Dimensions (mm)

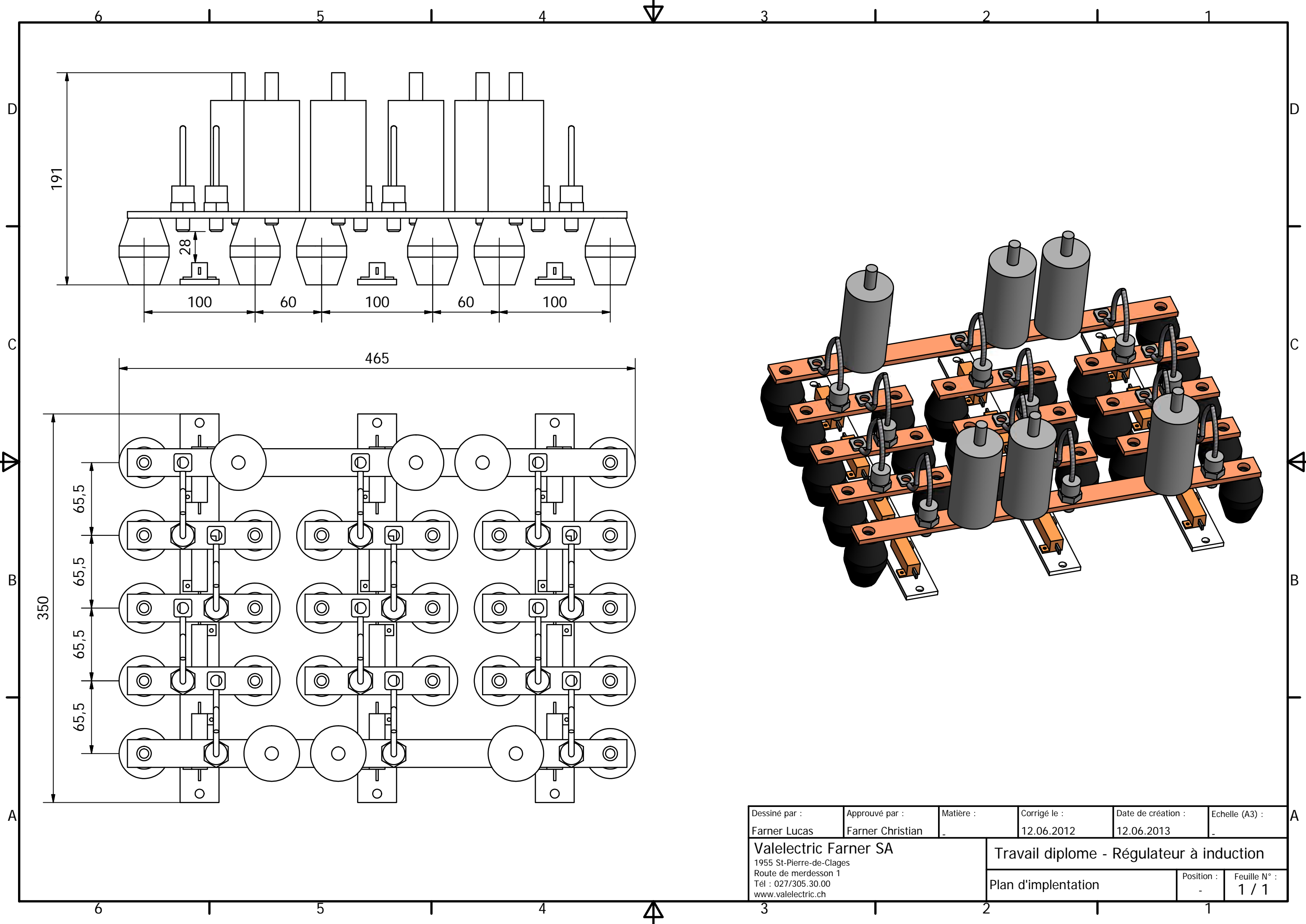
Size	A Max	B Max	C Max	D Max	E Max	F ± 0.3	G ± 0.3	H Max	J Max	K Max	L $\pm 0.25^*$	M Max
HS10	16.5	30.0	8.8	8.5	15.9	11.3	12.4	4.5	2.4	1.8	2.4	
HS15	21.0	36.5	11.0	11.2	19.9	14.3	15.9	5.5	2.8	1.8	2.4	
HS25	28.0	51.0	14.6	14.0	27.3	18.3	19.8	7.3	4.7	2.6	3.2	
HS50	29.7	72.5	14.8	14.2	49.1	39.7	21.4	8.5	5.2	2.6	3.2	
HS75	47.5	72.0	24.1	27.3	48.7	29.0	37.0	11.8	10.4	3.7	4.4	
HS100	47.5	88.0	24.1	27.3	65.2	35.0	37.0	11.8	15.4	3.7	4.4	
HS150	47.5	121.0	24.1	27.3	97.7	58.0	37.0	11.8	20.4	3.7	4.4	
HS200	72.5	145.7	41.8	45.5	89.7	70.0	57.2	20.5	10.4	5.5	5.1	103.4
HS250	72.5	167.0	41.8	45.5	109.7	89.0	57.2	20.5	10.4	5.5	5.1	122.4
HS300	72.5	184.4	41.8	45.5	127.7	104.0	59.0	20.5	12.4	5.5	6.6	141.4

* HS200-HS300 Watts ± 0.45

Annexe 12

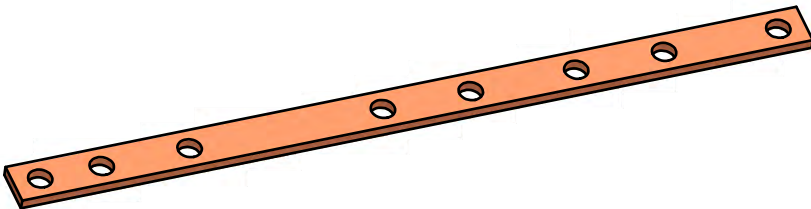
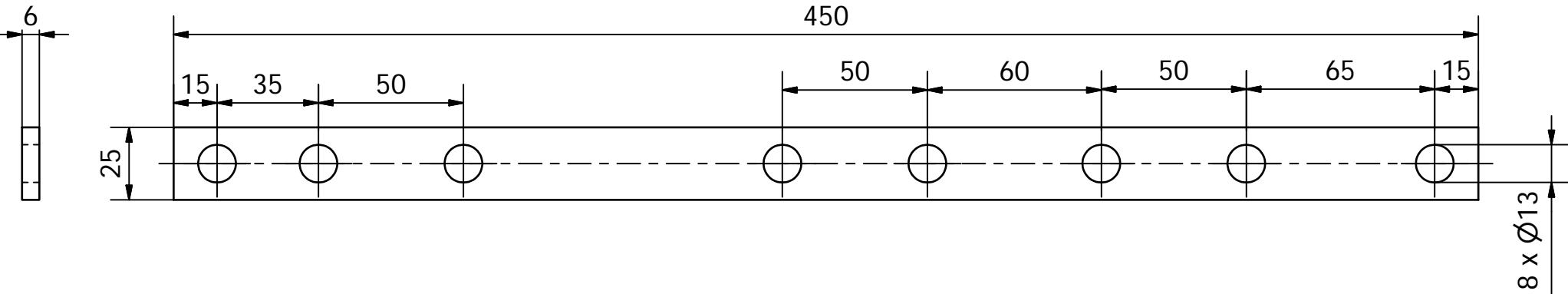
**Schéma électrique et plan d'implantation
du redresseur triphasé**



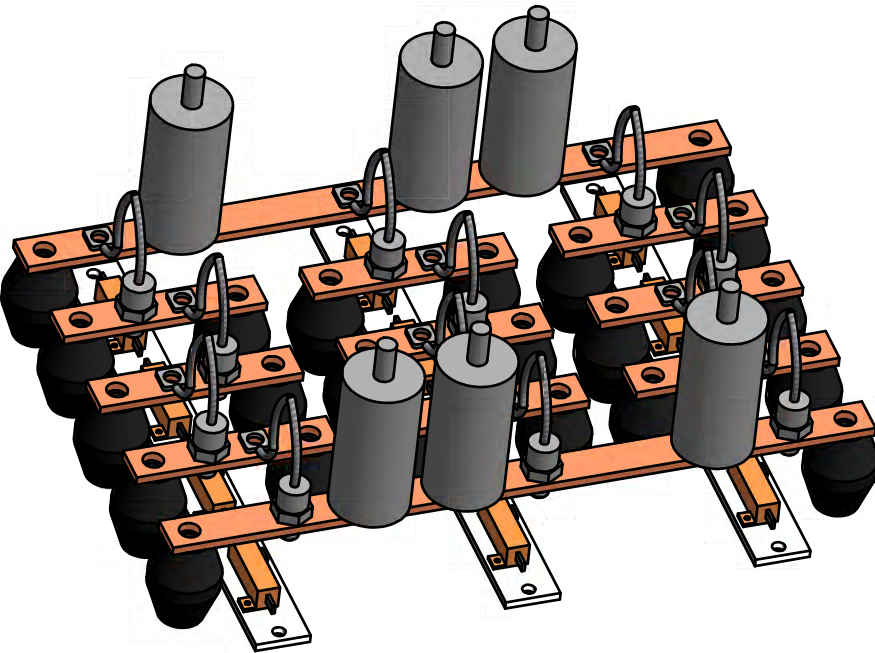
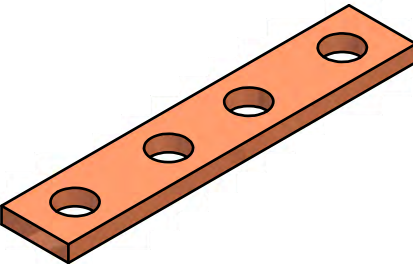
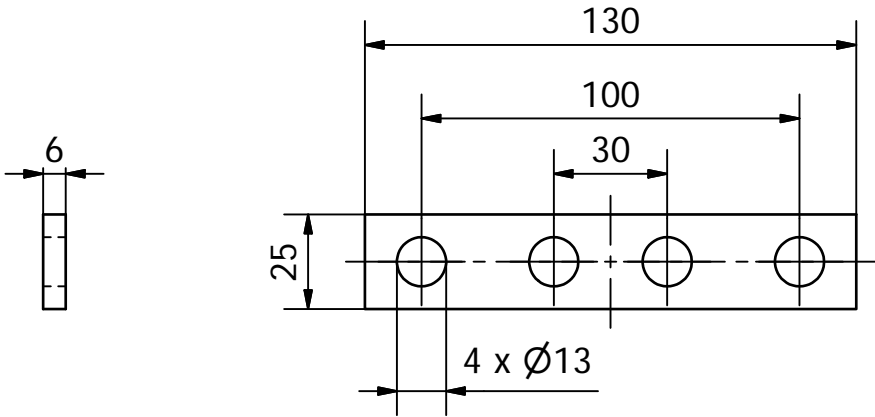


Dessiné par : Farner Lucas	Approuvé par : Farner Christian	Matière : -	Corrigé le : 12.06.2012	Date de création : 12.06.2013	Echelle (A3) : -
Valelectric Farner SA 1955 St-Pierre-de-Clages Route de merdesson 1 Tél : 027/305.30.00 www.valelectric.ch			Travail diplome - Régulateur à induction		
			Plan d'implentation	Position : -	Feuille N° : 1 / 1

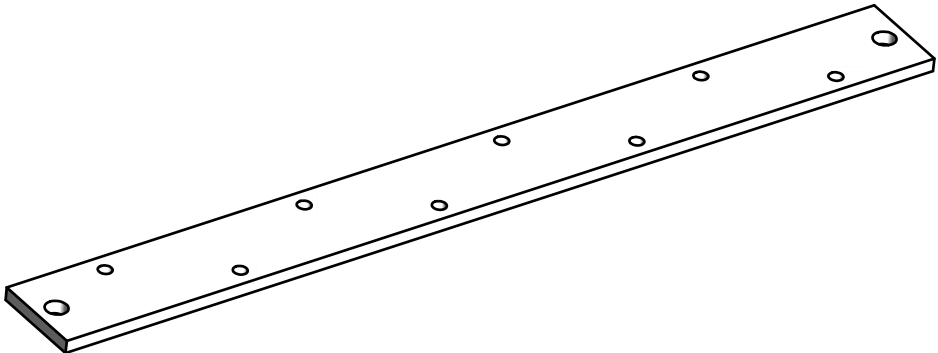
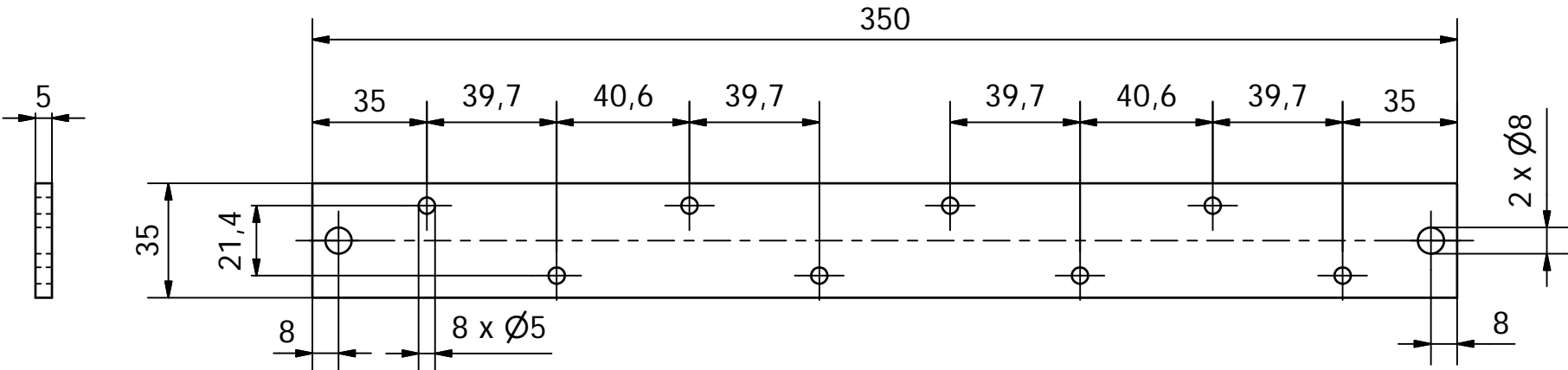
Barre cuirve suppot DC / Matière : Cuivre 1/2 dur / Quantité : 2



Barre cuirve suppot Diode / Matière : Cuivre 1/2 dur / Quantité : 9



Plaque isolante suppot résistance / Matière : Plastique ou isolant / Quantité : 3



Dessiné par : Farner Lucas	Approuvé par : Farner Christian	Matière : -	Corrigé le : 12.06.2012	Date de création : 12.06.2013	Echelle (A3) : 1 : 2
Valelectric Farner SA 1955 St-Pierre-de-Clages Route de merdesson 1 Tél : 027/305.30.00 www.valelectric.ch			Travail diplome - Régulateur à induction		
Piece pour redresseur			Position : -	Feuille N° : 1 / 1	