

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



المدرسة الوطنية متعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Departement Electrotechnique

Université d'Artois

Laboratoire Systèmes Électrotechniques et
Environnement



UNIVERSITÉ D'ARTOIS



MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Électrotechnique

Dimensionnement, réalisation et caractérisation fréquentielle d'un transformateur de mesure de tension

Abdelkrim KISSERLI

Sous la direction de :

M. Stéphane DUCHESNE

Professeur

M. Madjid TEGUAR

Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 6 juillet 2023, devant le jury composé de :

M. Abdelouahab MEKHALDI

Professeur ENP

Président

M. Stéphane DUCHESNE

Professeur Univ d'Artois

Promoteur

M. Madjid TEGUAR

Professeur ENP

Promoteur

M. Omar TOUHAMI

Professeur ENP

Examinateur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



المدرسة الوطنية متعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Departement Electrotechnique

Université d'Artois

Laboratoire Systèmes Électrotechniques et
Environnement



UNIVERSITÉ D'ARTOIS



MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Électrotechnique

Dimensionnement, réalisation et caractérisation fréquentielle d'un transformateur de mesure de tension

Abdelkrim KISSERLI

Sous la direction de :

M. Stéphane DUCHESNE

Professeur

M. Madjid TEGUAR

Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 6 juillet 2023, devant le jury composé de :

M. Abdelouahab MEKHALDI

Professeur ENP

Président

M. Stéphane DUCHESNE

Professeur Univ d'Artois

Promoteur

M. Madjid TEGUAR

Professeur ENP

Promoteur

M. Omar TOUHAMI

Professeur ENP

Examinateur

ENP 2023

ملخص : يتعلق هذا العمل بقياس الأبعاد والانجاز واختبارات الدقة والتوصيف الترددي لمحول تحريضي للقياس من النوع Y12P ، المصنوع من قبل SADTEM ، فرنسا. تم تنفيذ هذه الإجراءات وفقاً لمعايير IEC 61869-1 و IEC 61869 -3 . صنف الى ذلك، تم اعتماد أفضل فئة دقة، وهي 0.2 (تتطلب أخطاء نسبة و طور أقل من 0.2% و 10 دقائق). بناءً على مواصفات LSEE، تم إجراء القياس باستخدام حاسب طور بالشركة. تم تنفيذ الانجاز في الشركة على عدة مراحل ، وهي لف اللفات الأولية والثانوية ، تجميع أعمدة النواة المغناطيسية على اللفات ، تطبيق طبقة واقية من الفلين على اللب المغناطيسي والقولية. تم إجراء اختبارات قياس عند التردد الصناعي قبل القولية وبعدها. على مستوى LSEE، تمثل التحدي في اقتراح منصة تجريبية قادرة على إعادة إنتاج نفس اختبار الدقة الذي تم إجراؤه في SADTEM حيث تم الحصول على المنصة النهائية والتحقق من صحتها بعد إدخال تحسينين على المنصة الابتدائية. تم تقليل أخطاء النسبة والطور إلى أقل من 0.1% و 10 دقائق على التوالي. ومع ذلك ، فإن استخدام المنصة للاختبارات بتردد متغير من 50 إلى 500 هرتز ، لم يعط نتائج مرضية ابتداء من 200 هرتز ، لأن خطأ النسبة و خطأ الطور تجاوزا 0.2% و 10 دقائق على التوالي. تم اقتراح آفاق لتحسين المنصة التجريبية للترددات العالية .

الكلمات المفتاحية : محول قياس، محول تحريضي، استجابة ترددية، معيار، فئة الدقة.

Abstract: This work deals with the dimensioning, the construction and the tests of precision and frequency characterization of the inductive voltage measurement transformer of type Y12P, manufactured by SADTEM, France. These procedures were carried out in accordance with the IEC 61869 -1 and IEC 61869 -3 standards. Furthermore, the finest accuracy class, namely 0.2 (requiring ratio and phase errors less than 0.2% and 10 min), has been adopted. Based on LSEE specifications, the dimensioning was carried out using a calculator developed by the company. The construction was carried out at the company in several stages, namely, the winding of the primary and secondary windings, the assembly of the columns of the magnetic core on the windings, the application of a protective cork layer on the magnetic core and the molding. Power frequency benchmark tests were performed before and after molding. At LSEE, the challenge was to propose a test bench capable to reproduce the same precision test carried out at SADTEM. The final bench was obtained and validated after two improvements made on the initial one. Ratio and phase errors were reduced to less than 0.1% and 10 min respectively. However, the use of this test bench for the variable frequency tests from 50 to 500 Hz, did not give satisfactory results from 200 Hz, because the error of ratio and that of phase exceeded 0.2% and at 10 min respectively. Perspectives have been proposed to improve the test bench for high frequencies.

Key words: Measurement transformer, inductive transformer, frequency response, standard, accuracy class.

Résumé : Ce travail porte sur le dimensionnement, la construction et les tests de précision et de caractérisation fréquentielle du transformateur inductif de mesure de tension de type Y12P, fabriqué à la SADTEM, France. Ces procédures ont été réalisées conformément aux normes CEI 61869 -1 et CEI 61869 -3. Par ailleurs, la classe de précision la plus fine, à savoir 0,2 (exigeant des erreurs de rapport et de phase inférieures à 0,2% et 10 min), a été adoptée. En se basant sur des spécifications établies par le LSEE, le dimensionnement a été effectué par le biais d'un calculateur développé par l'entreprise. La construction a été réalisée à l'entreprise en plusieurs étapes à savoir, le bobinage des enroulements primaire et secondaire, l'assemblage des colonnes du noyau magnétique sur les enroulements, l'application d'une couche de liège protectrice sur le noyau magnétique et le moulage. Des tests de référence à fréquence industrielle ont été effectués avant et après le moulage. Au niveau du LSEE, le défi était de proposer un banc d'essais capable de reproduire le même test de précision effectué à la SADTEM. Le banc final a été obtenu et validé près deux améliorations apportées à celui initial. Les erreurs de rapport et de phase ont été réduites à moins de 0,1% et de 10 min respectivement. Cependant, l'utilisation de ce banc d'essai pour les tests à fréquence variable de 50 à 500 Hz, n'a pas donné de résultats satisfaisants à partir de 200 Hz, du fait que l'erreur de rapport et celle de phase ont dépassé 0,2% et à 10 min respectivement. Des perspectives ont été proposées en vue d'améliorer le banc d'essais pour les hautes fréquences.

Mots clés : Transformateur de la mesure, transformateur inductif, réponse fréquentielle, norme, classe de précision.

Remerciements

Avant d'approfondir cette expérience, il est opportun de commencer ce rapport de stage par des remerciements. Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude au **Pr. Jean-Philippe LECOINTE**, directeur du LSEE, qui m'a ouvert les portes du laboratoire et a généreusement fait de ce stage un moment très enrichissant.

Je souhaite également remercier le **Pr. Stéphane DUCHESNE**, professeur à l'Université d'Artois, ainsi que le **Pr. Madjid TEGUAR**, professeur et directeur du laboratoire de recherche en électrotechnique de l'ENP, pour leur confiance en me permettant de travailler sur ce projet. Leur soutien constant et leurs efforts inlassables ont grandement contribué à élargir mes connaissances dans le domaine du génie électrique. Je les remercie également pour leurs précieux conseils et leur bienveillance tout au long de ce stage.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers **M. Sylvain LEFEBVRE** et **M. Josué DELVILLE**, cadres à l'entreprise SADTEM, pour m'avoir ouvert les portes de la SADTEM et pour leur dévouement continu visant à accroître mes connaissances professionnelles, tant sur le plan théorique que pratique.

Enfin, mes remerciements vont à toutes les équipes du LSEE et de la SADTEM, qui ont jouées un rôle essentiel dans le bon déroulement de ce projet de fin d'études, en créant les conditions propices à sa réalisation.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	14
1 Généralités sur les transformateurs	16
1.1 Introduction	17
1.2 Théorie et principe	17
1.3 Transformateur à noyau d'air	18
1.4 Transformateur à noyau de fer	19
1.4.1 Construction du transformateur	19
1.4.2 Équations électromagnétiques	20
1.5 Caractéristiques générales du noyau de fer	21
1.5.1 Hystérésis magnétique	22
1.5.1.1 Magnétisme résiduel et rétentivité	22
1.5.1.2 La force coercitive	22
1.5.2 Perte par hystérésis	22
1.5.3 Importance de la boucle d'hystérésis	23
1.5.4 Pertes de Foucault	24
1.6 Schéma équivalent d'un transformateur	25
1.6.1 Elements du circuit equivalent	25
1.6.1.1 Résistances des enroulements primaire et secondaire	25
1.6.1.2 Flux mutuels et flux de fuite	25
1.6.1.3 Résistance de magnétisation	26
1.6.2 Équations du schéma équivalent	26
1.7 Schéma équivalent simplifié	27
1.7.1 Schéma équivalent ramené au primaire	27
1.7.2 Schéma équivalent ramené au secondaire	28
1.8 Détermination des élément du schéma équivalent	29
1.8.1 Tensions, puissance et rapport du transformateur	30
1.8.2 Essai à vide (en circuit ouvert)	30
1.8.3 Essai de court-circuit	31
1.9 Types de transformateurs	33
1.9.1 Transformateur de puissance et de distribution	33
1.9.2 Transformateurs à sec (dry-type)	33

1.9.3	Transformateur de mesure	34
1.9.4	Transformateur de tension à échelons	35
1.9.5	Transformateurs à tension constante	35
1.10	Conclusion	36
2	Transformateurs de mesure	37
2.1	Introduction	38
2.2	Types de transformateur de mesure	38
2.3	Domaines d'application	38
2.4	Matériaux de conception du noyau	39
2.5	Types de charges connectées	40
2.6	Technologies des transformateurs de mesure de tension	40
2.6.1	Transformateur de Tension Inductif (TTI)	40
2.6.2	Transformateurs de tension capacitif (TTC)	41
2.6.3	Transformateur de tension résistif	42
2.6.4	Transformateur de tension optique (TTO)	42
2.7	Normes industrielles	43
2.8	Normes CEI dédiées aux transformateurs de mesure	43
2.8.1	Présentation de la CEI	44
2.8.2	La norme CEI 61869-1 : Exigences générales pour transformateurs de mesure	45
2.8.2.1	Aperçu de l'ensemble des normes complémentaires	45
2.8.2.2	Organisation de la norme	45
2.8.3	La norme CEI 61869-3 : Exigences supplémentaires concernant les transformateurs inductifs de tension	46
2.8.3.1	Domaine d'application	46
2.8.4	Termes, définitions et abréviations	46
2.8.4.1	Définitions générales	47
2.8.4.2	Définitions liées aux caractéristiques diélectriques	47
2.8.4.3	Définitions liées à la précision	47
2.8.5	Grandeurs assignées au transformateur de tension	48
2.8.5.1	Niveaux de tension primaire	48
2.8.5.2	Puissance de sortie de précision	49
2.8.5.3	Classe de précision assignée	49
2.8.5.4	Tension secondaire assignée	49
2.8.5.5	Valeurs normales du facteur de tension assigné	50
2.9	Transformateur de tension inductif(TTI)	51
2.9.1	Principe de base	51
2.9.2	Circuit équivalent	51
2.9.3	Diagramme de phase	52
2.10	Mode de défaillance	52
2.10.1	Phénomène de court-circuit au secondaire	52
2.10.2	Contrainte diélectrique sur l'enroulement primaire	53
2.11	Calcul d'erreurs d'un TTI	53
2.11.1	Calcul d'erreur de rapport ϵ_k	53
2.11.2	Erreur à vide	54

2.11.3	Erreur en charge	54
2.11.4	Erreur globale	54
2.11.5	Attribution d'une classe précision à un TTI	55
2.12	Analyse d'erreur d'un TTI à haute fréquence	55
2.12.1	Phénomène de la non-linéarité d'un transformateur inductif (TI)	55
2.12.2	Test de référence de l'INRIM : FH1	57
2.12.3	Compensation de la non-linéarité du circuit magnétique des TIs par la méthode SINDECOMPE	57
2.12.3.1	Principe de la méthode	57
2.12.3.2	Résultats de la méthode	58
2.12.3.3	Limite de la méthode	58
2.12.4	Procédure simplifiée pour l'identification précise de la réponse en fréquence des TTs	58
2.12.4.1	Principe de la méthode	58
2.12.5	Résultats de la méthode	59
2.13	Conclusion	60
3	Dimensionnement et construction du transformateur Y12P	61
3.1	Introduction	62
3.2	Présentation de l'entreprise SADTEM	62
3.3	Dimensionnement du transformateur	65
3.3.1	Cahier de charge	65
3.3.2	Détermination des paramètres de dimensionnement du transformateur	65
3.3.3	Éléments du schéma équivalent	67
3.4	Calcul préliminaire des erreurs	67
3.4.1	Calcul lors du dimensionnement	67
3.4.2	Correction de l'erreur de rapport	67
3.5	Construction du transformateur Y12P	68
3.5.1	Principaux composants du transformateur	68
3.5.1.1	Noyau en fer	68
3.5.1.2	Caniveau	69
3.5.1.3	Enroulements primaire et secondaire	69
3.5.2	Bourrage en papier	69
3.5.3	Moulage en résine	69
3.5.4	Support d'appui	69
3.5.5	Préparation du bon de commande	70
3.5.6	Bobinage secondaire	70
3.5.7	Bobinage primaire	71
3.5.8	Assemblage du noyau	72
3.5.9	Gansage	72
3.5.10	Test des performances du transformateur avec l'équipement OMICRON VOTANO 100	73
3.5.10.1	Présentation du VOTANO 100	73
3.5.10.2	Courbe de magnétisation	74

3.5.10.3	Calcul des erreurs de rapport et de phase	75
3.5.11	Éléments du schéma équivalent	76
3.5.12	Moulage	76
3.6	Essais après réalisation : tests de référence	77
3.6.1	Courbe de magnétisation	77
3.6.2	Éléments du schéma équivalent	78
3.6.2.1	Calcul d'erreurs	79
3.7	Comparaison des résultats avant et après la coulée du transformateur	79
3.8	Conclusion	79
4	Caractérisation fréquentielle du transformateur Y12P	81
4.1	Introduction	82
4.2	Équipements utilisés	82
4.2.1	Source de tension alternative : KEYSIGHT AC6802B	82
4.2.2	Oscilloscope TEKTRONIX MSO4034	82
4.2.3	Oscilloscope TEKTRONIX MSO58	83
4.2.4	Sonde de mesure moyenne tension TEKTRONIX P6015A	84
4.2.5	Sonde de mesure basse tension TEKTRONIX P5205	84
4.2.6	Thermomètre FLUKE 52 II	85
4.3	Réalisation du banc d'essais	85
4.4	Protocole d'essais	87
4.4.1	Vérification des branchements	87
4.4.2	Fermeture et verrouillage de l'enceinte climatique	87
4.4.3	Allumage des équipements et configuration	87
4.4.4	Mise sous tension d'un transformateur	88
4.4.5	Début des tests	88
4.5	Test de précision à 50 Hz : essai 1	88
4.5.1	Procédé du test	88
4.5.2	Résultats du test	88
4.5.3	Discussion des résultats	88
4.5.4	Analyse des anomalies	89
4.6	Test de précision à 50 Hz : essai 2	90
4.6.1	Amélioration du banc d'essais	90
4.6.2	Principe de mesure	91
4.6.3	Résultats du test	91
4.6.4	Discussion des résultats	91
4.6.5	Estimation numérique de l'erreur de rapport	92
4.6.6	Résultats obtenus par calcul numérique	92
4.6.7	Discussion des résultats numériques	92
4.6.8	Analyse des anomalies	92
4.7	Test de précision à 50 et 60 Hz : essai 3	93
4.7.1	Banc d'essais	93
4.7.2	Procédé de mesure	94
4.7.3	Résultats obtenus	94
4.7.4	Discussion des résultats	95
4.8	Tests en fréquence variable de 100 à 500 Hz	96

4.8.1	Procédé de test	96
4.8.2	Résultats obtenus	96
4.8.3	Analyse des résultats	96
4.9	Conclusion	99
5	Conclusion générale et perspective	100
5.1	Conclusion générale	101
5.2	Perspective	104
A	Fiche technique commerciale du transformateur Y12P SADTEM	105
B	Fiche de dimensionnement générée par le calculateur SADTEM	107
C	Dessin technique de conception de transformateur SADTEM Y12P	109
D	Dessin de technique de conception du noyau magnétique du transformateur SADTEM Y12P	111
E	Rapport de test au VOTANO 100	113
F	Bon de commande de fabrication SADTEM	115
	Bibliographie	117

Table des figures

1.1	Principe de fonctionnement d'un transformateur	18
1.2	Schéma d'un transformateur à noyau d'air	18
1.3	Transformateur monophasé (noyau et enroulements)	20
1.4	Cycle d'hystérésis	22
1.5	Boucle d'hystérésis pour différents matériaux magnétiques	23
1.6	Noyau en fer solide	24
1.7	Noyau laminé	25
1.8	Circuit équivalent d'un transformateur réel monophasé	26
1.9	Schéma des flux de fuite et mutuels	26
1.10	Circuit équivalent ramené au primaire	28
1.11	Circuit équivalent ramené au secondaire	28
1.12	Circuit réduit ramené au secondaire	29
1.13	Plaque signalitique d'un transformateur SADTEM	30
1.14	Essai à vide	31
1.15	Essai à vide	32
1.16	Transformateur de puissance triphasé	33
1.17	Transformateur dry-type	34
1.18	Transformateur de mesure SADTEM out door	34
1.19	Changeurs de prises en charge	35
1.20	Schéma d'un transformateur à tension constante	35
2.1	Branchement de transformateurs de mesure	39
2.2	Courbe d'aimantation de différents matériaux magnétiques	40
2.3	Évolution du TTC	42
2.4	Schéma fonctionnel du transducteur de l'instrument	43
2.5	Circuit équivalent ramené au secondaire	51
2.6	Diagramme de phase selon le circuit équivalent de la figure 2.5	52
2.7	Tension U_{DL} entre spires	53
2.8	Diagramme de phase selon le circuit équivalent à vide	54
2.9	Erreur de rapport en fréquence obtenu avec différentes amplitudes de basse tension et réponse du FH1 (réponse en fréquence de référence mesurée à la tension nominale plus harmonique)	56
2.10	Erreur de rapport associée à la troisième harmonique appliquée en fonction de son déphasage sans et avec la méthode de compensation SINDICOMP [28].	57

2.11	Comparaison entre l'erreur de rapport mesurée avec un balayage de fréquence de 7 V, l'erreur ajustée et la réponse approximative proposée.	60
3.1	Laboratoire électrique de SADTEM	63
3.2	Machines de bobinage	63
3.3	Machines de moulage	64
3.4	Laboratoire tests R&D	64
3.5	Magasin de stockage et préparation de commandes	65
3.6	Circuit équivalent ramené au secondaire	67
3.7	Demi-noyau avant l'assemblage.	68
3.8	Caniveau.	69
3.9	Caniveau prêt au bobinage avec un thermocouple	70
3.10	Bobinage de l'enroulement secondaire	71
3.11	Enroulement secondaire	71
3.12	Enroulement primaire	71
3.13	Circuit magnétique du transformateur	72
3.14	Transformateur avec une couche de liège " <i>le gansage</i> "	72
3.15	OMICRON VOTANO 100	73
3.16	Processus de détermination en variant la fréquence à basse tension	74
3.17	Courbe de magnétisation avant coulée	74
3.18	Circuit équivalent avant coulée	76
3.19	Transformateur dans le moule prêt pour la coulée	76
3.20	Transformateur Y12P	77
3.21	Courbe de magnétisation Y12P	77
3.22	Circuit équivalent après coulée	78
4.1	GBF KEYSIGHT AC6802B	82
4.2	Oscilloscope TEKTRONIX MSO4034	83
4.3	Oscilloscope TEKTRONIX MSO58	83
4.4	Sonde TEKTRONIX P6015A	84
4.5	Sonde TEKTRONIX P5205	85
4.6	Thermomètre Fluke II	85
4.7	Schéma du banc d'essais	86
4.8	Banc d'essais au LSEE	87
4.9	Courbe de l'erreur de rapport en fonction de la tension d'alimentation (essai 1)	89
4.10	Banc d'essais amélioré (deuxième réalisation)	90
4.11	Courbe de l'erreur de rapport en fonction de la tension d'alimentation (essai 2)	91
4.12	Courbe de l'erreur de rapport en fonction de la tension d'alimentation	93
4.13	Schéma électrique de l'essai 3	94
4.14	Fiche de données générale du test de précision à 10 kV/50 Hz	95
4.15	Tracés de la tension primaire V_{AN} , la tension secondaire V_{an}^2 , le rapport de transformation m , l'erreur de rapport $\epsilon_k(\%)$ et l'erreur de phase $\Delta\phi(^{\circ})$ en fonction de la fréquence	98

5.1	Circuit de test proposé	104
-----	-----------------------------------	-----

Liste des tableaux

2.1	Valeurs de la charge pour les dispositifs courants	41
2.2	Normes de transformateur de mesure	44
2.3	Normes de la famille CEI 61869-1	46
2.4	Gammes de tension primaire	48
2.5	Gammes de charge	49
2.6	Gammes de précision	49
2.7	Gammes de tension secondaire	50
2.8	Gammes de facteur de tension	50
2.9	Validation d'une classe de précision	55
2.10	Valeurs absolues des erreurs de rapport et de phase du TT et TC à chaque ordre harmonique, avec et sans compensation/charge	59
3.1	Cahier de charge du transformateur	65
3.2	Dimensionnement du transformateur	66
3.3	Calcul des erreurs avec le logiciel de SADTEM	68
3.4	Tableaux de données de magnétisation du transformateur Y12P avant coulée	75
3.5	Tableau des erreurs pour les différentes charges et tensions du trans- formateur avant coulée	75
3.6	Tableaux de données de magnétisation du transformateur Y12P après coulée	78
3.7	Tableau des erreurs pour les différentes charges et tensions après coulée	79
4.1	Résultats du test de précision à 50 Hz (essai 1)	89
4.2	Résultats du test de précision à 50 Hz (essai 2)	91
4.3	Résultats du traitement de donné avec MATLAB (essai 2)	93
4.4	Résultats du test de précision à l'aide de la FFT à 50 Hz et 60 Hz	95

Je dédie mon travail à mes chers parents, à mes frères et sœurs, ainsi qu'à ma mamie bien-aimée. Je souhaite également dédier mon travail à la mémoire de mon grand-père, Ahmed. Que Dieu, le Tout-Puissant, l'ait en Sa sainte miséricorde.

Introduction générale

Les transformateurs de mesure sont les organes de perception de tous les réseaux et les installations électriques. Ils participent de manière considérable à la quantification des grandeurs électriques, à savoir le courant et la tension ainsi que le déphasage. En outre, ils sont utilisés, entre autres, dans le comptage de l'énergie, la surveillance et la protection des réseaux électriques, dans le transport ferroviaire. De ce fait, une défaillance dans leur fonctionnement peut engendrer un grave danger pour les personnes, des dommages et des coûts importants pour les appareillages environnants [1, 2].

Les transformateurs de mesure sont divisés, selon leur fonction et domaines d'application, en deux grandes catégories, à savoir les transformateurs de tension (TT) et ceux de courant (TC). Leurs secondaires sont généralement connectés à des dispositifs de surveillance et de mesure tels que les wattmètres, les compteurs de facteur de puissance (PF), les voltmètres, les ampèremètres et les relais [3].

L'industrie des transformateurs de mesure s'appuie fortement sur les normes internationales, dont les plus populaires sont la CEI 61869 -1 [4] et la CEI 61869 -3 [5]. Ces normes couvrent les transformateurs de mesure destinés à être utilisés avec des appareils de mesure ou des dispositifs de protection fonctionnant à fréquence industrielle. Il est important de noter que les normes internationales actuelles traitant des transformateurs de mesure ne sont pas dédiées aux applications liées à une large bande fréquentielle.

Le présent travail porte sur le dimensionnement, la construction ainsi que la caractérisation fréquentielle du transformateur de mesure de tension de type Y12P. Ce dernier a été fabriqué à l'entreprise SADTEM (France), conformément aux normes CEI 61869 -1 et CEI 61869 -3 et suivant une classe de précision très fine, à savoir 0,2. Cette classe exige que les erreurs de rapport et de phase doivent être inférieures à 0,2% et 10 min ($0,116^\circ$).

Le dimensionnement de ce transformateur a été réalisé par le biais d'un calculateur interne de la SADTEM. En partant du cahier de charge établi par le LSEE, ce calculateur a permis de fournir les paramètres nécessaires à un bon dimensionnement du transformateur. La réalisation du transformateur a été effectuée aux ateliers de fabrication de l'entreprise. Pour ce faire, plusieurs procédés industriels ont été

suivis, à savoir le bobinage des enroulements, l'assemblage des colonnes du noyau magnétique sur les enroulements, l'application d'une couche de liège protectrice sur le noyau magnétique et le moulage. Avant et après le moulage, des tests de précision à fréquence industrielle ont été appliqués. Il s'agit d'estimer les erreurs de rapport et de phase et de les comparer aux limites requises par la classe 0,2.

Nous avons procédé, au LSEE, à la réalisation d'un banc d'essais capable de reproduire le test de précision effectué à la SADTEM. Pour cela, plusieurs tentatives et améliorations ont été faites. Le banc d'essais final permettant l'obtention des erreurs de rapport et de phase inférieures aux limites requises par la classe 0,2, a été utilisé pour tester le transformateur sur une bande de fréquences allant de 50 à 500 Hz.

Ainsi, notre mémoire est structuré en quatre chapitre distincts. Le premier chapitre est dédié aux généralités sur les transformateurs. Nous y trouvons, également, leur principe de fonctionnement, suivi par des notions sur les transformateurs à noyau d'air et à noyau de fer. s'en succède la présentation du schéma équivalent du transformateur ainsi que le calcul de ses éléments. Nous clôturons ce chapitre par présenter les différents types de transformateurs.

Le deuxième chapitre est structuré en deux parties distinctes. La première est consacrée aux transformateurs de mesure en mettant l'accent sur ceux de tension. Nous y dévoilons, en particulier, leurs domaines d'utilisation, les matériaux de leurs noyaux ainsi que leurs types et technologies. La deuxième partie est destinée à la présentation des normes internationales adoptées par l'industrie des transformateurs de mesure. Cette partie comporte également les principaux termes, définitions et abréviations utilisés dans ce mémoire.

Le troisième chapitre porte sur le dimensionnement, la construction et les tests de précision à fréquentielle industrielle. Ces procédures ont été effectuées à la SAD-TEM conformément aux normes CEI 61869 -1 et CEI 61869 -3 et suivant une classe de précision très fine, à savoir 0,2.

Le quatrième et dernier chapitre expose les différentes phases de l'élaboration du banc d'essais ainsi que leurs résultats à fréquence industrielle et améliorations apportées en vue d'obtenir des erreurs de rapport et de phase inférieures aux limites requises par la classe 0,2. Nous y présentons, également, les résultats et leurs interprétations et discussions pour des fréquences entre 50 et 500 Hz.

Nous terminons, notre mémoire, par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail. Cette conclusion est suivie par des perspectives permettant d'améliorer davantage le banc d'essais pour les mesures à hautes fréquences.

Chapitre 1

Généralités sur les transformateurs

1.1 Introduction

Le transformateur est un convertisseur AC/AC utilisé dans un circuit pour augmenter ou diminuer la tension sans toucher à la puissance du circuit. Pour bien dimensionner un transformateur, on doit le schématiser par un circuit équivalent approprié et déterminer les paramètres de celui-ci. Pour cela, on doit procéder à deux types d'essais à savoir à vide et en court-circuit. L'essai à vide est réalisé pour mesurer la consommation du transformateur lorsqu'il n'alimente aucune charge. Le but de cet essai est de mesurer les pertes fer du transformateur lié au circuit magnétique. Il permet aussi de déterminer la résistance et la réactance du circuit magnétique ainsi que le rapport de transformation. L'essai en court-circuit est utilisé pour tester la capacité du transformateur sous courant très fort en cas d'un court-circuit. Cet essai permet de mesurer les pertes par effet joule dans les deux enroulements (primaire et secondaire). Il permet également de déterminer le rapport de transformation ainsi que les résistances et les réactances des deux enroulements primaire et secondaire, en mesurant les courants et les puissances active et réactive absorbées [6].

Ce chapitre est dédié aux généralités sur les transformateurs. Nous y trouvons leur principe de fonctionnement, les matériaux de leurs noyaux, leurs types, les caractéristiques de leurs noyaux en fer ainsi que leur schéma électrique équivalent et celui simplifié.

1.2 Théorie et principe

Les transformateurs sont des appareils qui transfèrent l'énergie d'un circuit à un autre au moyen d'un champ magnétique commun. A l'exception des auto-transformateurs, il n'y a pas de connexion électrique directe d'un circuit à l'autre.

Lorsqu'une tension sinusoïdale E_1 est appliquée à l'enroulement primaire d'un transformateur, un flux sinusoïdal d'amplitude ϕ_m et de fréquence f est créé dans le noyau de fer qui relie les conducteurs de l'enroulement primaire N_1 , comme illustré sur la figure 1.1a. Si un autre enroulement est placé dans le champ créé par le premier enroulement N_1 de telle sorte que le noyau de fer relie les conducteurs l'enroulement secondaire N_2 et que les lignes de flux traversent cet enroulement, une tension E_2 est induite dans le deuxième enroulement, comme illustré sur la figure 1.1b [3, 7].

L'utilisation d'un champ magnétique provenant d'une bobine pour induire une tension dans une seconde bobine est le principe sur lequel reposent la théorie et l'application des transformateurs.

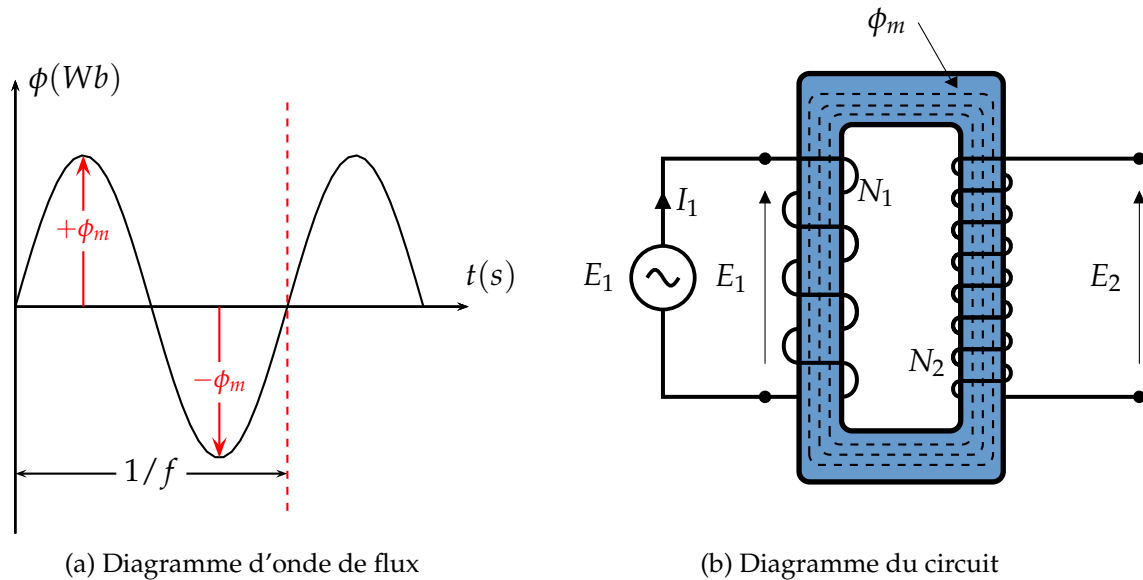


FIGURE 1.1 – Principe de fonctionnement d'un transformateur

1.3 Transformateur à noyau d'air

Certains petits transformateurs destinés à des applications de faible puissance sont construits avec de l'air entre les deux bobines (Figure 1.2). Ces transformateurs sont inefficaces car le flux traversant les deux bobines est faible. La tension induite dans la deuxième bobine est déterminée comme suit [8] :

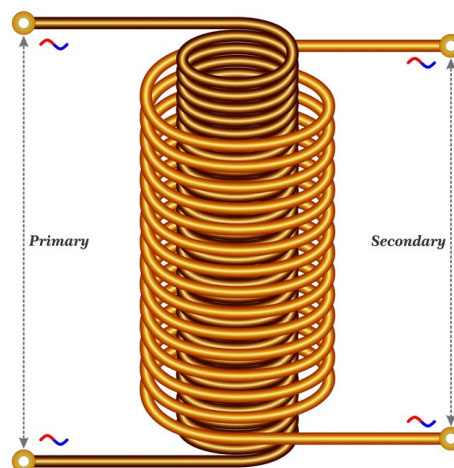


FIGURE 1.2 – Schéma d'un transformateur à noyau d'air [8]

$$E = \frac{N d\phi}{10^8 dt} \quad (1.1)$$

avec :

- N est le nombre de spires de la deuxième bobine ;
- $d\phi/dt$ est la variation du flux reliant la bobine par rapport au temps ;
- ϕ est le flux dans les lignes de spires.

A l'instant où la tension appliquée à la bobine est égale à E et le flux reliant les bobines est égal à ϕ , la tension instantanée de l'alimentation est :

$$e = \sqrt{2} E \cos(\omega t) = N \frac{d\phi}{10^8 dt} \quad (1.2)$$

La valeur maximale du flux est donnée par :

$$\phi = \frac{\sqrt{2} E 10^8}{2\pi f N} \quad (1.3)$$

avec le système MKSA où le flux est en weber :

$$E = \frac{N d\phi}{dt} \quad (1.4)$$

et

$$\phi = \frac{\sqrt{2} E}{2\pi f N} \quad (1.5)$$

Étant donné que la quantité du flux ϕ circulant dans la deuxième bobine représente un faible portion du flux de la première bobine, la tension induite dans la deuxième bobine est donc faible. Il est possible d'augmenter le nombre de spires pour accroître la tension de sortie, mais cela augmente le coût. Il faut donc augmenter la quantité du flux créé par la première bobine et qui traverse la deuxième bobine [3].

1.4 Transformateur à noyau de fer

La capacité du fer ou de l'acier à transporter un flux magnétique est beaucoup plus grande que celle de l'air. Cette capacité à transporter le flux est appelée perméabilité. Les aciers électriques modernes ont une perméabilité de l'ordre de 1500 contre 1.0 pour l'air. Cela signifie que la capacité d'un noyau d'acier à transporter un flux magnétique est 1500 fois supérieure à celle de l'air [9].

Les noyaux en acier ont été utilisés dans les transformateurs de puissance lorsque les circuits de courant alternatif pour la distribution de l'énergie électrique ont été introduits pour la première fois [10]. Lorsque deux bobines sont appliquées sur un noyau d'acier, comme illustré sur la figure 1.3, presque 100 % du flux de la bobine 1 circule dans le noyau de fer, de sorte que la tension induite dans la bobine 2 est égale à la tension de la bobine 1 si le nombre de spires des deux bobines est le même.

1.4.1 Construction du transformateur

En général, les principaux éléments d'un transformateur sont [11] :

le circuit magnétique comprenant principalement le noyau du transformateur avec ses branches et ses culasses ;

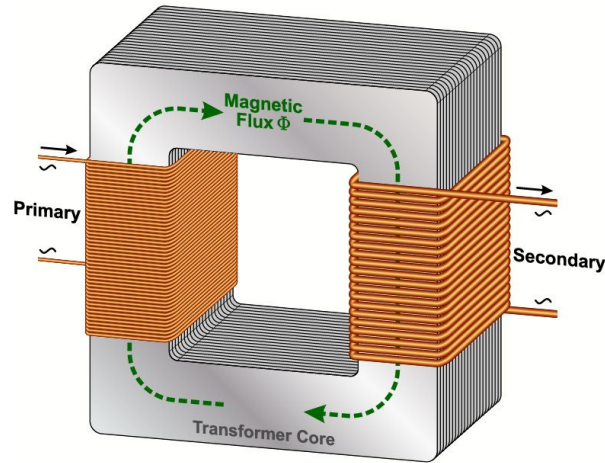


FIGURE 1.3 – Transformateur monophasé (noyau et enroulements) [8]

les circuits électriques comportant principalement les enroulements, l'isolation et les traversées ;

la cuve contenant principalement les dispositifs de refroidissement, le conservateur et les appareils auxiliaires.

La construction d'un transformateur dépend largement de sa puissance et de la fonction qu'il doit remplir. Les concepteurs apportent les modifications nécessaires en fonction des besoins. Dans la pratique, la construction des transformateurs fait l'objet d'améliorations constantes [11].

1.4.2 Équations électromagnétiques

Dans le système MKSA, la relation fondamentale entre la densité du flux magnétique \vec{B} et l'intensité du champ magnétique \vec{H} est la suivante [12] :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1.6)$$

avec μ_0 la perméabilité du vide exprimée en $Wb A^{-1}m^{-1}$ est égale à $4\pi \times 10^{-7}$.

En remplaçant \vec{B} par $\frac{\phi}{S}$ et \vec{H} par $\frac{NI}{d}$, tel que :

- ϕ le flux circulant dans le noyau ;
- N le nombre de spire d'une bobine ;
- I le courant maximal exprimé en Ampère ;
- d est la longueur moyenne de la bobine en mètre ;
- S la section du noyau de fer en mètre carré.

l'équation 1.6 peut s'écrire :

$$\phi = \frac{\mu NSI}{d} \quad (1.7)$$

L'équation du flux dans le noyau de fer est alors la suivante :

$$\phi = \frac{\mu_0 \mu_r NSI}{d} \quad (1.8)$$

μ_r est la perméabilité relative du fer égale à environ 1500.

On peut considérer que flux circule de manière uniforme dans tout le noyau de fer, car ce dernier a une perméabilité très élevée par rapport à l'air. Voici une façon possible d'exprimer l'équation du flux dans le noyau :

$$\phi = \frac{0,225 E}{fN} \quad (1.9)$$

avec :

- E est la tension alternative appliquée aux bornes de la bobine ;
- f est la fréquence de la tension appliquée en hertz ;
- N est le nombre de spires de l'enroulement.

Dans le dimensionnement des transformateurs, il est très utile d'exprimer l'induction magnétique \vec{B} et la tension E de la manière suivante :

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{0,225 E}{fSN} \quad [Wb.m^{-2}] \quad (1.10)$$

$$E = 4,44 N f S B \quad [V] \quad (1.11)$$

Naturellement, le flux ϕ va parcourir les enroulements primaire et secondaire du transformateur. Les tensions aux bornes de enroulements primaire E_1 et secondaire E_2 sont exprimées comme suit :

$$E_1 = 4,44 N_1 f \phi$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f S \phi$$

avec N_1 et N_2 représentent les nombres de spires au primaire et au secondaire respectivement.

Au final, l'analyse mathématique tirée de [12] nous permet de retrouver le rapport de transformation m du transformateur :

$$m = \frac{E_2}{E_1} = \frac{4,44 N_2 f \phi}{4,44 N_1 f \phi} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1.12)$$

1.5 Caractéristiques générales du noyau de fer

Lorsqu'une tension est appliquée à l'enroulement excitateur ou primaire du transformateur, un courant magnétisant circule dans l'enroulement primaire. Ce courant produit le flux dans le noyau. Le flux dans les circuits magnétiques est analogue au flux de courant dans les circuits électriques. Lorsque le flux circule dans le noyau d'acier, des pertes se produisent dans l'acier. Ces pertes ont deux composantes, que l'on appelle les pertes de **Foucault** et les pertes par **hystérésis** [3].

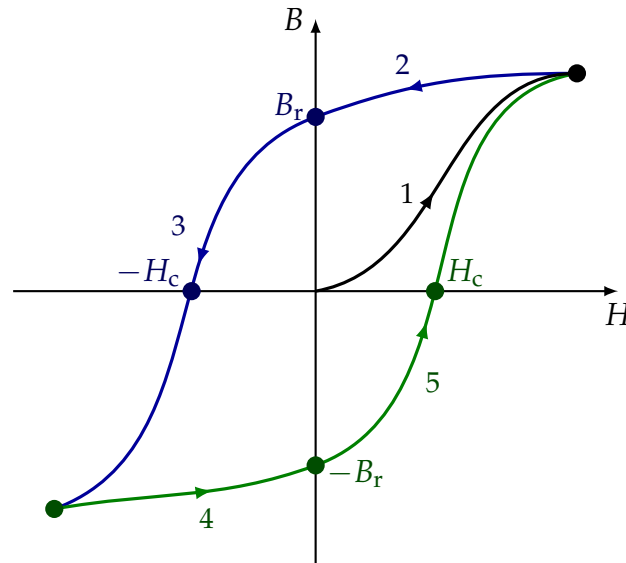


FIGURE 1.4 – Cycle d'hystérésis

1.5.1 Hystérésis magnétique

Lorsqu'un matériau magnétique est magnétisé d'abord dans un sens puis dans l'autre (c'est-à-dire un cycle de magnétisation), on constate que la densité de flux \vec{B} dans le matériau est en retard sur la force de magnétisation appliquée \vec{H} , comme illustré sur la figure 1.4. Ce phénomène est connu sous le nom d'hystérésis magnétique. Le terme *hystérésis* est dérivé du mot grec *hysterein*, qui signifie *rester à la traîne*.

Par conséquent, le phénomène de décalage de la densité de flux \vec{B} par rapport à la force d'aimantation \vec{H} dans un matériau magnétique est appelé hystérésis magnétique [12].

1.5.1.1 Magnétisme résiduel et rétentivité

La valeur de densité de flux retenue par le matériau magnétique, lorsque la force H est nulle est appelée *magnétisme résiduel* et noté B_r et la force de maintien de ce magnétisme est appelé *rétentivité du matériau*.

1.5.1.2 La force coercitive

Le magnétisme résiduel du matériau magnétique est éliminé par l'application d'une force magnétisante H_c dans la direction voulue, appelée *force coercitive*. Par conséquent, $2 H_c$ est la force coercitive totale requise dans un cycle d'aimantation pour effacer le magnétisme résiduel.

1.5.2 Perte par hystérésis

Lorsqu'une force d'aimantation est appliquée, le matériau magnétique est magnétisé et les aimants moléculaires sont alignés dans une direction particulière.

Toutefois, lorsque la force d'aimantation d'un matériau magnétique est inversée, le frottement interne des aimants moléculaires s'oppose à l'inversion du magnétisme, ce qui entraîne une hystérésis. Le travail effectué par la force d'aimantation contre ce frottement interne des aimants moléculaires produit de la chaleur. Cette énergie, qui est perdue sous forme de chaleur en raison de l'hystérésis, est appelée *perte d'hystérésis*. Sa formule est la suivante :

$$P_h = K_h B_{max}^n f \quad (1.13)$$

où :

- K_h est une constante dont la valeur dépend du matériau ferromagnétique et du volume du noyau ;
- B_{max} est la densité de flux maximale ;
- n varie entre 1,5 et 2,5 ;
- f la fréquence d'alimentation.

La perte par hystérésis se produit dans toutes les parties magnétiques des machines électriques lorsqu'il y a inversion de la magnétisation. Cette perte entraîne une déperdition d'énergie sous forme de chaleur. Par conséquent, elle augmente la température de la machine, ce qui n'est pas souhaitable. C'est pourquoi un matériau magnétique approprié est sélectionné pour la construction de ces pièces, par exemple l'acier au silicium qui convient le mieux pour réduire au minimum la perte d'hystérésis [13].

1.5.3 Importance de la boucle d'hystérésis

La forme et la taille de la boucle d'hystérésis d'un matériau magnétique dépendent largement de sa nature. Pour un usage particulier, le choix du matériau magnétique dépend de la surface de sa boucle d'hystérésis.

Les boucles d'hystérésis de certains matériaux magnétiques courants sont illustrées à la figure 1.5 suivante[12].

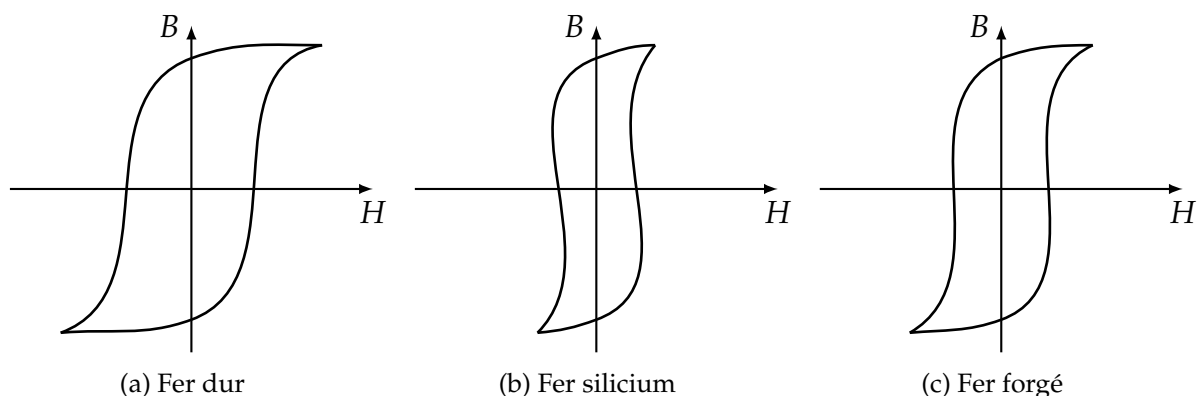


FIGURE 1.5 – Boucle d'hystérésis pour différents matériaux magnétiques [12]

Fer dur : la boucle d'hystérésis pour l'acier dur est illustrée à la figure 1.5a. La surface de cette boucle est plus grande, ce qui indique que ce matériau présente une perte d'hystérésis plus importante. C'est pourquoi, il n'est jamais utilisé pour la construction de pièces de machines. Cependant, cette boucle montre que le matériau a une rétentivité et une coercivité élevées. Il convient donc mieux à la fabrication d'aimants permanents.

Fer silicium : la boucle d'hystérésis du fer silicium est illustrée à la figure 1.5b. La surface de cette boucle est la plus petite, ce qui indique que ce matériau présente une faible perte d'hystérésis. C'est pourquoi, il convient le mieux à la construction des pièces de machines électriques dans lesquelles l'inversion de l'aimantation est très rapide, par exemple l'induit des machines à courant continu, le noyau des transformateurs, le démarreur des moteurs à induction, etc.

Fer forgé : la figure 1.5c montre la boucle d'hystérésis pour le fer forgé. Cette boucle montre que ce matériau possède un magnétisme résiduel et une coercivité assez bonne. C'est pourquoi, il convient le mieux à la fabrication de noyaux d'électro-aimants [12].

1.5.4 Pertes de Foucault

Considérons une induction \vec{B} ayant une trajectoire perpendiculaire à une section transversale d'un noyau de fer (Figure 1.6). Une tension sera induite dans le chemin en raison de la variation temporelle du flux enfermé dans le chemin. Par conséquent, un courant, connu sous le nom de courant de *Foucault* (*eddy current* en anglais), circulera autour de la trajectoire. Comme le matériau du noyau a une résistance, une perte de puissance Ri^2 sera causée par le courant de Foucault et apparaîtra sous forme de chaleur dans le noyau [14].

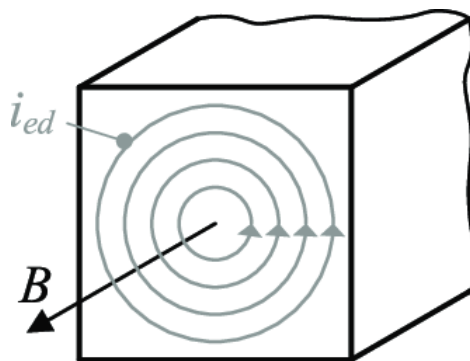


FIGURE 1.6 – Noyau en fer solide [15]

La formule des pertes par courant de Foucault dans un noyau magnétique soumis à un flux variable dans le temps est la suivante :

$$P_e = K_e B_{max}^2 f^2 \quad (1.14)$$

avec K_e est une constante dont la valeur dépend du type de matériau et de son épaisseur de stratification où l'épaisseur du feuilletage varie de 0,5 à 5 mm dans

les machines électriques et de 0,01 à 5 mm dans les dispositifs utilisés dans les circuits électroniques fonctionnant à des fréquences plus élevées [14].

La perte due aux courants de Foucault peut être réduite de deux façons :

- On peut utiliser un matériau de base à haute résistivité. L'ajout de quelques pour cent de silicium (environ 4%) au fer augmentera la résistivité de manière significative.
- On peut utiliser l'empilement de tôle magnétique (Figure 1.7). Les fines tôles sont isolées les unes des autres. La stratification est réalisée dans le plan du flux. Dans les transformateurs et les machines électriques, les parties qui sont constituées d'un noyau magnétique et qui transportent un flux variable dans le temps sont normalement stratifiées [14].

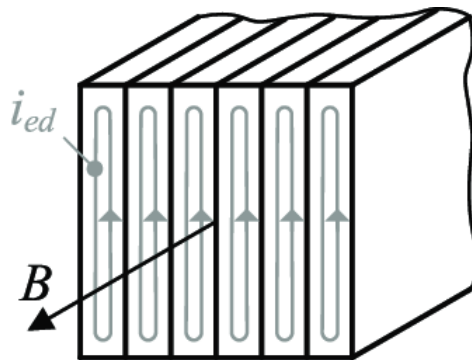


FIGURE 1.7 – Noyau laminé [15]

1.6 Schéma équivalent d'un transformateur

En régime alternatif, sinusoïdal et à fréquence industriel (50 ou 60 Hz), un transformateur réel a des résistances primaire et secondaire R_1 et R_2 , des réactances de fuite primaire et secondaire X_1 et X_2 , des pertes de fer et de cuivre et une résistance et une réactance de magnétisation R_0 et X_m , respectivement. Le circuit équivalent d'un transformateur réel est illustré sur la figure 1.8. Dans ce qui suit, nous allons détailler les différents éléments de ce circuit équivalent [16, 17] :

1.6.1 Elements du circuit equivalent

1.6.1.1 Résistances des enroulements primaire et secondaire

Dans un transformateur réel, les enroulements primaire et secondaire ont une certaine résistance représentée par R_1 et R_2 , respectivement.

1.6.1.2 Flux mutuels et flux de fuite

Le flux qui traverse les deux enroulements du transformateur est connu sous le nom de *flux mutuel* ϕ , tandis que le flux qui traverse seulement un enroulement du transformateur sans affecter l'autre est appelé *flux de fuite* ϕ_1 .

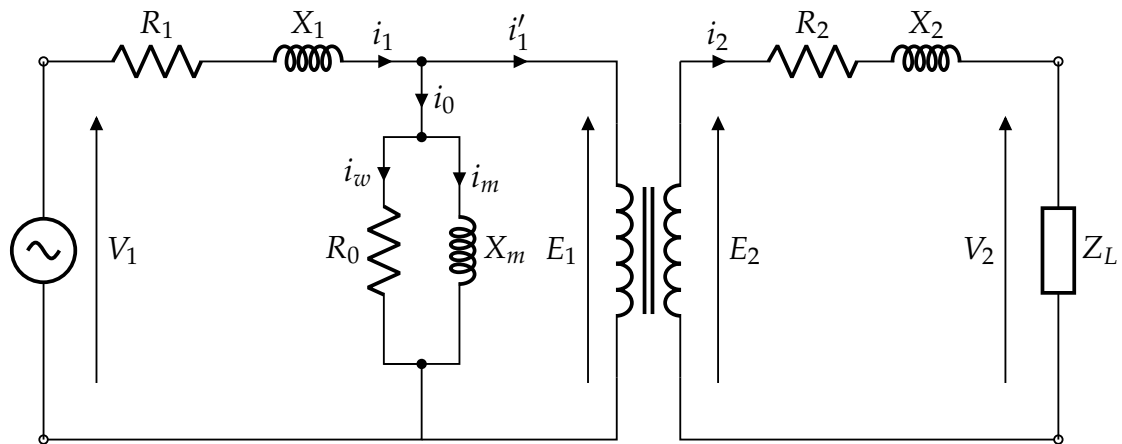


FIGURE 1.8 – Circuit équivalent d'un transformateur réel monophasé

Le flux de fuite primaire ϕ_{l1} est proportionnel au courant primaire I_1 . Il produit une auto-inductance $L_1 (= \frac{N_1 \phi_{l1}}{i_1})$ qui à son tour produit une réactance de fuite $X_1 (= 2 \pi f L_1)$. De même, le flux de fuite secondaire ϕ_{l2} produit une réactance de fuite $X_2 (= 2 \pi f L_2)$. Les flux de fuite et mutuels sont illustrés sur la figure 1.9 [17].

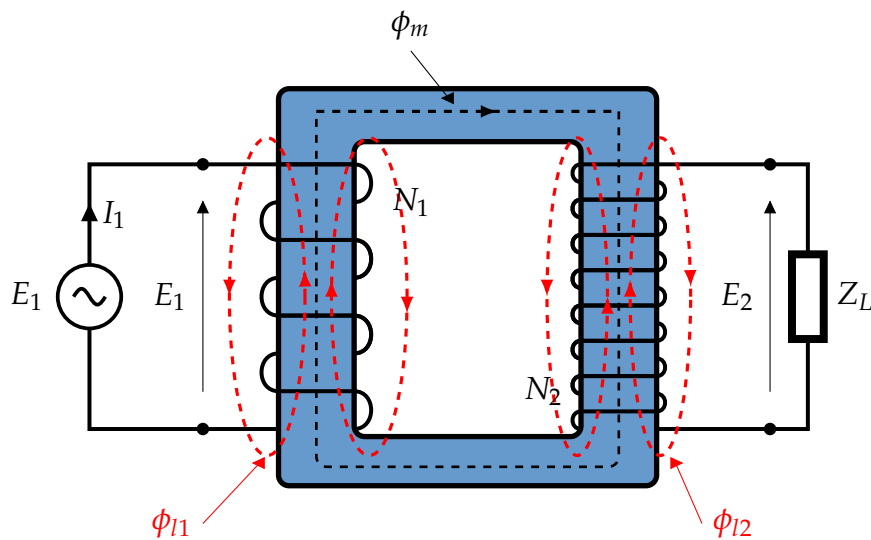


FIGURE 1.9 – Schéma des flux de fuite et mutuels

1.6.1.3 Résistance de magnétisation

La résistance de magnétisation R_0 représente les pertes fer (ou dans le noyau). Il s'agit des pertes dues à l'hystérésis et au courant de Foucault dans le noyau magnétique [13, 14].

1.6.2 Équations du schéma équivalent

Les équations suivantes sont obtenues à partir d'une analyse électrique du circuit illustré sur la figure 1.8.

L'impédance primaire et secondaire :

$$\overline{Z}_1 = R_1 + jX_1 \quad (1.15)$$

$$\overline{Z}_2 = R_2 + jX_2 \quad (1.16)$$

La tension d'alimentation du circuit est V_1 , et la présence de la résistance et de la réactance de fuite dans l'enroulement primaire entraîne une chute de tension à travers cet enroulement telle que :

$$\overline{V}_1 = \overline{E}_1 + \overline{I}_1 (R_1 + jX_1) = \overline{E}_1 + \overline{I}_1 \overline{Z}_1 \quad (1.17)$$

De manière similaire, la présence de la résistance et de la réactance de fuite dans l'enroulement secondaire entraîne également une diminution de la tension à travers cet enroulement. Cette chute de tension dans l'enroulement secondaire est la raison pour laquelle :

$$\overline{V}_2 = \overline{E}_2 - \overline{I}_2 (R_2 + jX_2) = \overline{E}_2 - \overline{I}_2 \overline{Z}_2 \quad (1.18)$$

1.7 Schéma équivalent simplifié

Le transformateur idéal représenté sur la figure 1.8 peut être déplacé vers la droite ou vers la gauche en rapportant toutes les quantités au côté primaire ou secondaire, respectivement. Les grandeurs référencées sont marquées par des nombres premiers. En analysant ce circuit équivalent, nous pouvons évaluer les grandeurs référencées et déterminer les grandeurs réelles en connaissant le rapport des spires [18].

Le modèle du circuit équivalent pour le transformateur réel est utilisé pour prédire le comportement du transformateur. Pour utiliser ce modèle de circuit équivalent, il est nécessaire de connaître les paramètres R_1 , X_1 , R_0 , X_m , R_2 , X_2 et m (le rapport des spires N_1/N_2). Si les données de conception complètes d'un transformateur sont disponibles, il est possible de calculer ces paramètres à partir des dimensions et des propriétés des matériaux utilisés.

1.7.1 Schéma équivalent ramené au primaire

Lorsque nous ramenons le circuit équivalent au côté primaire (Figure 1.10), tous les éléments du côté secondaire sont transférés vers le côté primaire. En tenant compte du rapport de transformation m , les grandeurs suivantes sont obtenues :

La FEM induite secondaire E_2 se réfère au côté primaire :

$$E'_2 = \frac{E_2}{m} \quad (1.19)$$

La tension aux bornes du secondaire (tension de charge) V_2 ramenée au primaire :

$$V'_2 = \frac{V_2}{m} \quad (1.20)$$

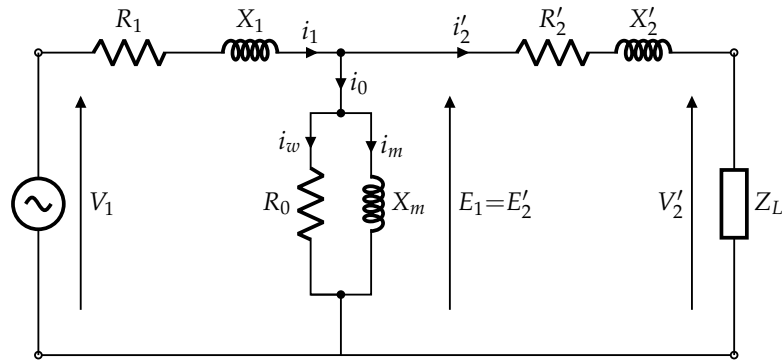


FIGURE 1.10 – Circuit équivalent ramené au primaire

La résistance secondaire R_2 par rapport au côté primaire :

$$R'_2 = \frac{R_2}{m^2} \tag{1.21}$$

La réactance secondaire X_2 par rapport au côté primaire :

$$X'_2 = \frac{X_2}{m^2} \tag{1.22}$$

1.7.2 Schéma équivalent ramené au secondaire

De même, nous pouvons ramener le circuit équivalent relatif au côté secondaire. Ce circuit est illustré sur la figure 1.11.

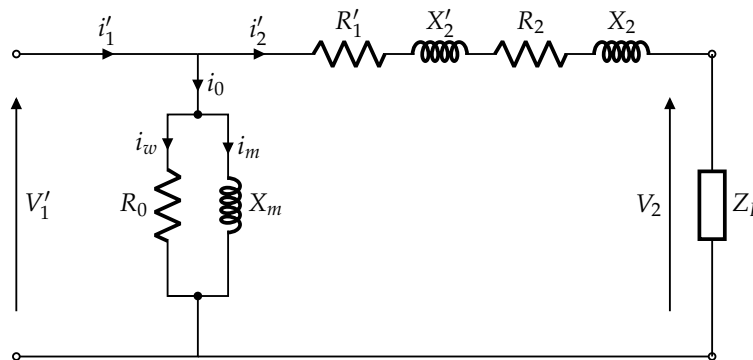


FIGURE 1.11 – Circuit équivalent ramené au secondaire

Lorsque nous ramenons le circuit équivalent au côté secondaire, tous les éléments du côté primaire sont transférés vers le côté secondaire. En tenant compte du rapport de transformation m , les grandeurs suivantes sont obtenues :

La tension aux bornes du primaire (tension d'alimentation) V_1 ramenée au secondaire :

$$V'_1 = m V_1 \tag{1.23}$$

La résistance primaire R_1 par rapport au côté secondaire :

$$R'_1 = m^2 R_1 \quad (1.24)$$

La réactance primaire X_1 par rapport au côté secondaire :

$$X'_1 = m^2 X_1 \quad (1.25)$$

En représentant les éléments équivalents, on obtient le modèle illustré sur la figure 1.12.

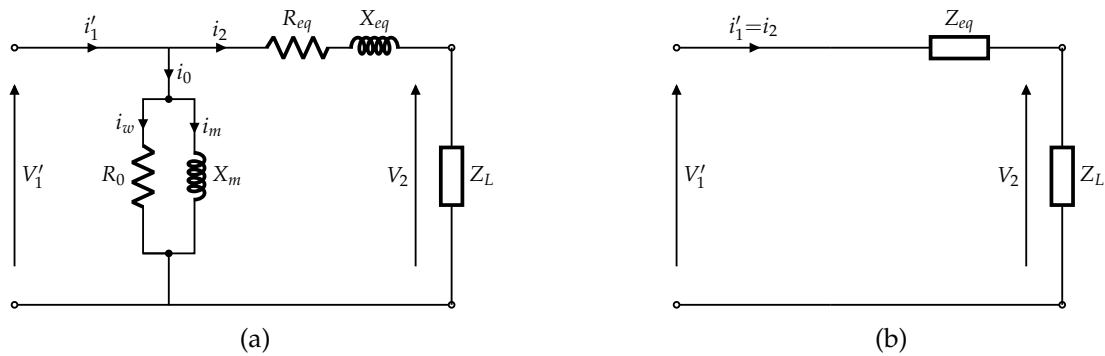


FIGURE 1.12 – Circuit réduit ramené au secondaire

avec :

$$R_{eq} = R'_1 + R_2 \quad (1.26)$$

$$X_{eq} = X'_1 + X_2 \quad (1.27)$$

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (1.28)$$

Il est à noter que dans certains cas, il est possible de négliger la branche magnétisante (Figure 1.12b), ce qui nous conduit à un modèle plus simple. Cependant, ce modèle simplifié ne convient pas à notre étude actuelle qui nécessite la prise en compte de tous les éléments du schéma équivalent. De plus, la modélisation d'un transformateur ne se limite pas aux schémas proposés, car il existe d'autres modèles qui conviennent à d'autres cadres d'études [19].

1.8 Détermination des éléments du schéma équivalent

Il est possible de prédire le comportement d'un transformateur à partir du circuit équivalent présenté sur la figure 1.10. Pour cela, il est nécessaire de connaître les éléments de conception.

Si les données de conception complètes d'un transformateur sont disponibles, ses paramètres peuvent être calculés à partir des dimensions et des propriétés des matériaux utilisés. Le calcul de certains éléments tels que l'inductance de fuite ($L_{1,2}$) peut s'avérer compliquée, car cela implique la prise en compte des liaisons de flux

partielles. Toutefois, il existe des formules qui permettent de déterminer ces grandeurs de manière fiable. Ces paramètres peuvent être déterminés directement en effectuant des tests qui consomment peu d'énergie : l'**essai à vide (ou en circuit ouvert)** et l'**essai en court-circuit**, permettent de déterminer les paramètres du circuit équivalent d'un transformateur [18].

1.8.1 Tensions, puissance et rapport du transformateur

La plaque signalétique d'un transformateur indique sa puissance en volts-ampères (VA), son rapport de transformation ainsi que sa tension nominale en volts. A titre d'exemple, la plaque signalétique sur la figure 1.13 est celle d'un transformateur de mesure SADTEM. Elle fournit les informations suivantes :

A-N : 10000V; a-n : 100V 10VA

Ces valeurs nominales ont les significations suivantes : les tensions indiquent que le transformateur possède deux enroulements, l'un de 10000 volts et l'autre de 100 volts qui sont proportionnelles au nombre de spires de chaque enroulement, et le rapport de tension représente également le rapport de transformation $m=100$. La valeur nominale de 10 VA signifie que chaque enroulement est conçu pour une puissance de 10 VA [18].

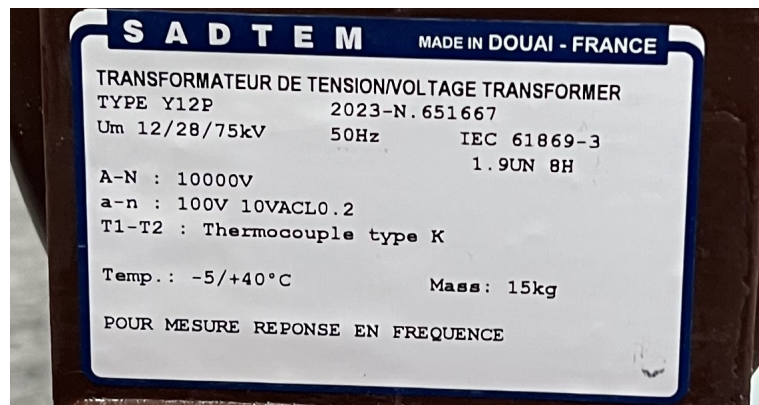


FIGURE 1.13 – Plaque signalétique d'un transformateur SADTEM

1.8.2 Essai à vide (en circuit ouvert)

Ce test est effectué en appliquant une tension soit au côté haute ou basse tension. Ainsi, si un transformateur 10000/100 volts doit être testé, la tension sera appliquée à l'enroulement basse tension, car une alimentation de 100 volts est plus facilement disponible qu'une alimentation de 10000 volts. La figure 1.14a présente un schéma de câblage pour l'essai en circuit ouvert d'un transformateur.

On note que l'enroulement secondaire est maintenu ouvert. Par conséquent, à partir du circuit équivalent du transformateur de la figure 1.14a, le circuit équivalent dans des conditions de circuit ouvert est illustré à la figure 1.14b. Le courant primaire est le courant d'excitation et les pertes mesurées par le wattmètre sont essentiellement les pertes du noyau [20].

Le circuit équivalent de la figure 1.14b montre que les paramètres R_0 et X_m peuvent être déterminés à partir des relevés du voltmètre, de l'ampèremètre et du wattmètre.

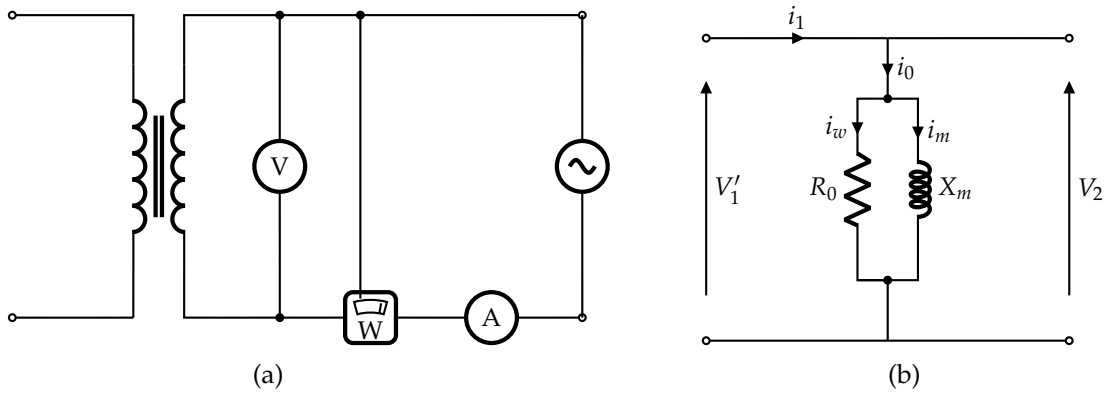


FIGURE 1.14 – Essai à vide

Il est à noter que les pertes dans le noyau seront les mêmes si 100 volts sont appliqués à l'enroulement basse tension ayant le plus petit nombre de spires ou si 10000 volts sont appliqués à l'enroulement haute tension ayant le plus grand nombre de spires. Les pertes dans le noyau dépendent de la valeur maximale du flux dans le noyau, qui est la même dans les deux cas, comme l'indique l'équation 1.11.

Dans notre hypothèse, le transformateur est considéré comme étant ouvert du côté haute tension, et nous ramenons le schéma équivalent du côté basse tension (alimentation). À partir du schéma illustré sur la figure 1.14b, nous pouvons avoir les équations suivantes :

$$P_{vide} = \frac{V_2^2}{R_0} \implies R_0 = \frac{V_2^2}{P_{vide}} \quad (1.29)$$

$$I_w = \frac{V_2}{R_0} \quad (1.30)$$

$$I_m = \sqrt{I_2^2 - I_w^2} \quad (1.31)$$

$$X_m = \frac{V_2}{I_m} \quad (1.32)$$

1.8.3 Essai de court-circuit

On réalise ce test en mettant un enroulement (basse ou haute tension) en court-circuit et en appliquant un courant nominal à l'autre enroulement (Figure 1.15a).

Dans le circuit équivalent du transformateur représenté sur la figure 1.12a, l'impédance de la branche d'excitation (composée de R_0 et X_m) est considérablement plus élevée que celle de la branche série (composée de R_{eq} et X_{eq}). Lorsque les bornes secondaires du transformateur sont court-circuitées, **l'impédance élevée de la branche d'excitation peut être négligée.**

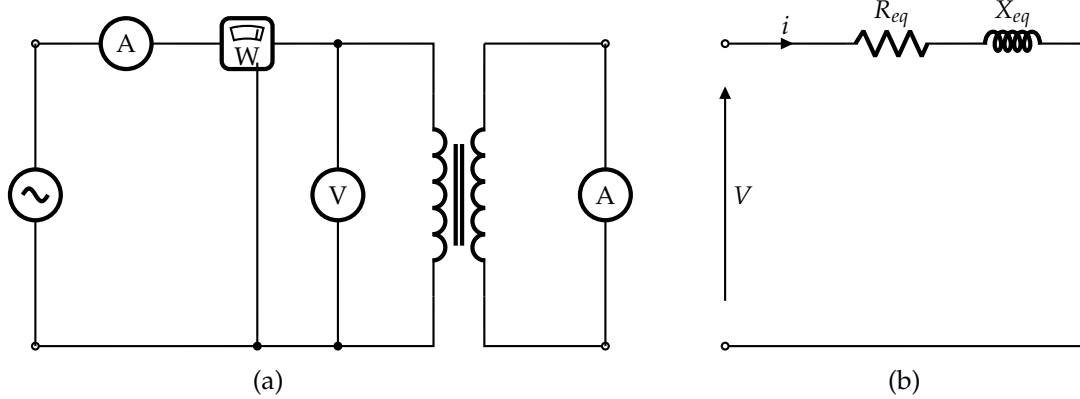


FIGURE 1.15 – Essai à vide

Le circuit équivalent avec le secondaire court-circuité peut donc être représenté par le circuit de la figure 1.15b. On notera que $Z_{eq} = R_{eq} + X_{eq}$ étant petit, seule une petite tension d'alimentation est nécessaire pour faire passer le courant nominal dans les enroulements. Il est pratique d'effectuer ce test en appliquant une tension à l'enroulement haute tension. Comme le montre la figure 1.15b, les paramètres R_{eq} et X_{eq} peuvent être déterminés à partir des relevés du voltmètre, de l'ampèremètre et du wattmètre.

Dans un transformateur bien conçu, les résistances R_1 et R_2 sont telles que $R_1 = m^2 R_2 = R'_2$, et les réactances X_1 et X_2 sont telles que $X_1 = m^2 X_2 = X'_2$. Il est important de noter que, lorsqu'une tension faible est appliquée en court-circuit, les pertes dans le noyau du transformateur sont négligeables. Par conséquent, la lecture du wattmètre peut être considérée comme représentant entièrement les pertes en cuivre dans les enroulements, qui sont représentées par R_{eq} [20]. L'exemple suivant illustre le calcul des paramètres du circuit équivalent d'un transformateur.

Dans notre hypothèse, le transformateur est considéré comme étant court-circuité du côté basse tension, et nous ramenons le schéma équivalent du côté haute tension (alimentation) [20]. À partir du schéma illustré sur la figure 1.15b, nous pouvons obtenir les équations suivantes :

$$P_{cc} = I_1^2 R_{eq} \implies R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_1^2} \quad (1.33)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_1}{I_1} \quad (1.34)$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (1.35)$$

Les paramètres suivants peuvent être ramenés, si besoin, au côté secondaire (basse tension) :

$$R_{eq}^{BT} = \frac{R_{eq}}{m^2} \quad (1.36)$$

$$X_{eq}^{BT} = \frac{X_{eq}}{m^2} \quad (1.37)$$

1.9 Types de transformateurs

1.9.1 Transformateur de puissance et de distribution

Le terme transformateur de puissance (Figure 1.16) désigne les transformateurs utilisés entre le générateur et les circuits de distribution, dont la puissance nominale est généralement égale ou supérieure à 500 kVA [3]. Il permet donc de faire transiter la puissance électrique en courant alternatif (AC) depuis la centrale de production d'électricité jusqu'à son utilisateur final avec un minimum de pertes, à différents niveaux de tension [21].



FIGURE 1.16 – Transformateur de puissance triphasé [8]

1.9.2 Transformateurs à sec (dry-type)

Un transformateur de type sec (Figure 1.17) est un transformateur dans lequel le milieu isolant entourant l'enroulement est un gaz ou un composé sec. En principe, tout transformateur peut être construit comme un transformateur "sec" tant que les valeurs nominales, en particulier la tension et le kVA, peuvent être respectées sans utiliser d'huile isolante ou d'autres milieux liquides [3].

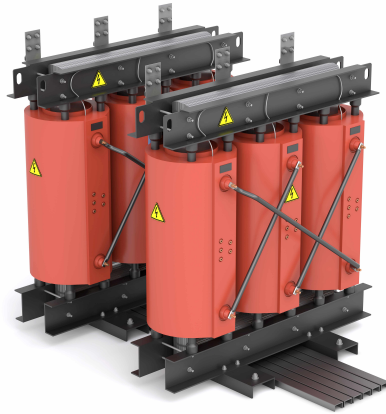


FIGURE 1.17 – Transformateur dry-type [8]

1.9.3 Transformateur de mesure

Un transformateur de mesure (Figure 1.18) est un dispositif utilisé pour réduire ou ajuster la valeur d'une grandeur électrique ou physique à des niveaux de mesure plus appropriés. Il permet de convertir une grandeur de grande amplitude en une grandeur équivalente de plus petite amplitude, afin de faciliter sa mesure ou son enregistrement avec des instruments de mesure appropriés [7].



FIGURE 1.18 – Transformateur de mesure SADTEM out door

Un réducteur de mesure peut être basé sur différents principes de fonctionnement, tels que des transformateurs de tension ou de courant, des diviseurs de tension ou de courant, des ponts de mesure, des amplificateurs d'instrumentation, etc. L'objectif principal est d'obtenir une mesure précise et fiable de la grandeur d'intérêt, tout en respectant les limites de fonctionnement des instruments de mesure utilisés [16].

1.9.4 Transformateur de tension à échelons

Appelé aussi *changeurs de prises en charge*, les régulateurs de tension monophasés à échelons maintiennent une tension constante en réglant la tension en charge lorsque l'amplitude de la tension dépasse les limites supérieures et inférieures spécifiées (Figure 1.19).

Lors de la manoeuvre du changeur de prises en charge, des arcs se produisent dans le commutateur. Afin d'éviter la contamination de l'huile du transformateur, le commutateur est logé dans un boîtier distinct du reste du transformateur 1.19. Le sélecteur de prises, qui est installé sous le boîtier du commutateur, se compose d'un mécanisme de sélection précise et, généralement, d'un présélecteur. On appelle *principe de commutation* le principe de fonctionnement des changeurs de prises qui sont généralement montés à l'intérieur de la cuve du transformateur et sont suspendus sous le couvercle du transformateur. Leur manoeuvre est assurée par un mécanisme d'entraînement à moteur monté à l'extérieur du transformateur, au moyen d'arbres et d'engrenages coniques [22].



FIGURE 1.19 – Changeurs de prises en charge

1.9.5 Transformateurs à tension constante

Le transformateur à tension constante (CVT) est une solution bien connue pour lutter contre le "bruit" électrique dans les installations industrielles. Les composants typiques d'un CVT sont illustrés sur la figure 1.20. Le shunt magnétique sur la réluctance du noyau central a pour effet de réduire la réluctance du noyau. Cela peut être considéré comme l'introduction d'une résistance supplémentaire en parallèle à une résistance existante. Le shunt magnétique dans la conception du CVT permet à la partie du noyau située en dessous du shunt magnétique de devenir saturée alors que la partie supérieure du noyau reste non saturée. Cette situation est due à la présence d'un espace d'air entre le shunt magnétique et les membranes du noyau. L'air a une réluctance beaucoup plus élevée que le noyau de fer. Par conséquent, la majeure partie du flux passe par la partie inférieure du noyau, comme le montrent les lignes épaisses de la figure 1.20.

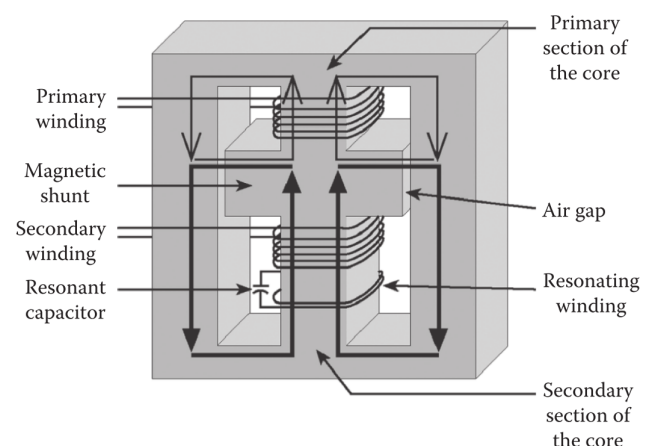


FIGURE 1.20 – Schéma d'un transformateur à tension constante

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les transformateurs. L'ouverture de ce chapitre s'opère tout d'abord en introduisant leur principe de fonctionnement. S'en succèdent, la présentation, la construction, l'utilisation ainsi que les caractéristiques magnétiques des transformateurs à noyau d'air et à noyau de fer. Nous nous sommes penchés, par la suite, sur la présentation du schéma équivalent du transformateur ainsi qu'au calcul de ses éléments électriques. Nous avons relaté, finalement, les différents types de transformateurs à savoir, les transformateurs à sec, de mesure, de tension à échelon et à tension constante.

Chapitre 2

Transformateurs de mesure

2.1 Introduction

Un transformateur de mesure (appelé aussi réducteur de mesure) est un appareil utilisé pour la mesure des forts courants et de hautes tensions électriques. Il permet de transformer des niveaux élevés de courant et de tension en des signaux exploitables par les équipements de mesure et de protection. La grandeur des signaux est normalisée de façon qu'elle soit préalablement connue, précise et généralement spécifiée par l'utilisateur [7, 16].

Les équipements chargés du comptage de l'énergie et de la protection du réseau sont des dispositifs de mesure à basse tension (BT) précis, rapides mais **fragiles**. De ce fait, ils sont souvent reliés à des transformateurs de mesure qui délivrent, avec une grande précision, des grandeurs mesurables relativement de faibles amplitudes, soit, typiquement de l'ordre de 1 A pour les courants et de 100 V pour les tensions. De plus, les transformateurs assurent une deuxième tâche importante consiste en l'isolation galvanique entre les grandeurs primaires et secondaires [7, 16].

Dans ce chapitre, nous abordons les transformateurs de mesure de manière générale, et ceux de tension en particulier, en évoquant les différentes technologies existantes. Ensuite, nous nous concentrons, plus en détails, sur le transformateur inductif de tension, les normes associées et les méthodes de calculs existantes.

2.2 Types de transformateur de mesure

Du point de vue fonction, les transformateurs de mesure sont divisés en deux catégories : les transformateurs de tension (TT) et les transformateurs de courant (TC). L'enroulement primaire du transformateur de tension est connecté en parallèle sur le réseau haute tension, tandis que l'enroulement primaire du transformateur de courant est connecté en série (Figure 2.1). Les enroulements secondaires transforment proportionnellement les niveaux primaires en valeurs typiques de 100 V et 1 A (pouvant varier selon le besoin ou la norme). Les dispositifs de surveillance tels que les wattmètres, les compteurs de facteur de puissance (PF), les voltmètres, les ampèremètres et les relais sont souvent connectés aux circuits secondaires [3].

2.3 Domaines d'application

Les transformateurs de mesure trouvent leur application dans différents domaines, notamment [1, 2] :

La surveillance des réseaux électriques : les transformateurs de mesure sont utilisés dans les réseaux de production, de transport et de distribution d'énergie. Ils permettent la collecte des données sur divers paramètres électriques

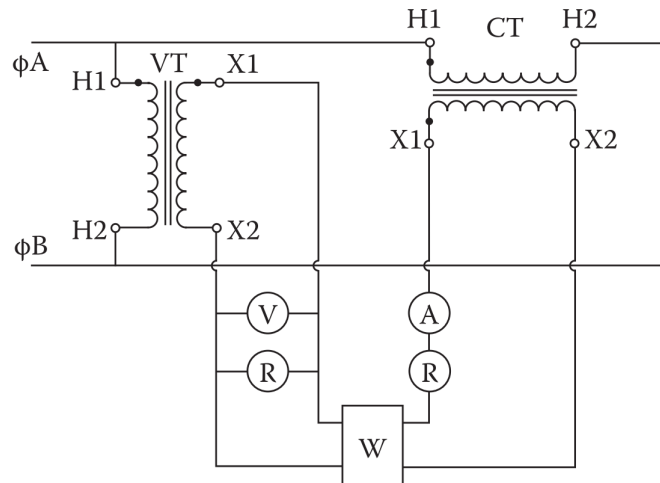


FIGURE 2.1 – Branchement de transformateurs de mesure

tels que la tension, le courant et la puissance. Ces données sont essentielles pour maintenir l'équilibre du réseau et éviter les effondrements.

le transport ferroviaire : les transformateurs de mesure sont utilisés pour surveiller la tension des caténaires dans le domaine du transport ferroviaire. Cela permet d'éviter les chutes de tension lors du passage des trains, assurant ainsi un fonctionnement optimal du système ferroviaire.

la mesure de la qualité de puissance : les transformateurs de mesure sont utilisés pour évaluer divers aspects liés à la qualité de l'énergie électrique. Cela comprend la distorsion harmonique, les fluctuations de tension, les déséquilibres et d'autres paramètres pertinents. Ces mesures sont essentielles pour garantir une alimentation électrique de haute qualité et identifier les problèmes potentiels dans le réseau.

2.4 Matériaux de conception du noyau

Dans la pratique, l'utilisation d'un noyau en fer est un facteur crucial qui affecte directement le comportement électromagnétique du transformateur. Différents alliages de noyau sont disponibles, tels que le fer-silicium, le fer-cobalt, le fer-nickel, qui offrent des propriétés distinctes pour la conception. L'alliage le plus couramment utilisé dans la fabrication des transformateur de mesure est le fer-silicium à grains orientés.

Ce matériau contient généralement de 2 à 4 % de silicium en masse, ce qui lui confère une augmentation significative de la dureté et de la limite d'élasticité, une amélioration notable de la laminabilité, une meilleure résistance à la corrosion, une multiplication de la résistivité par 4 et une réduction de l'anisotropie par 2, tout en présentant une perte de polarisation à saturation de moins de 10 % [23].

La figure 2.2 représente les courbes d'aimantation de différents matériaux magnétiques. On peut observer que le fer-silicium présente une performance supérieure en termes d'induction de saturation, avec une valeur de 1,9 T. Il est également remarquable que le fer-nickel nécessite un courant de magnétisation plus faible pour

atteindre la saturation magnétique. Ce qui peut être avantageux dans certaines applications où une réponse magnétique rapide est nécessaire [24].

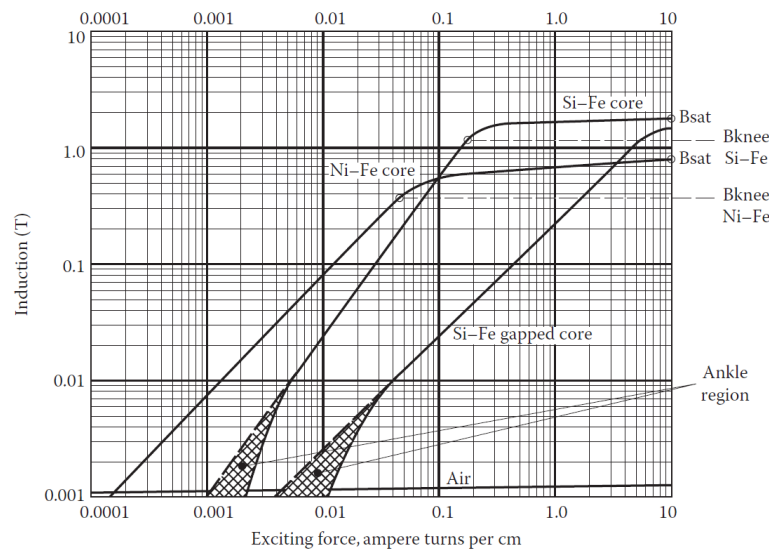


FIGURE 2.2 – Courbe d’aimantation de différents matériaux magnétiques [3]

2.5 Types de charges connectées

La charge du transformateur de mesure est considérée comme étant tout ce qui est connecté à l’extérieur de ses bornes secondaire (coté basse tension), comme les dispositifs de surveillance, les relais et les dispositifs de contrôle. Les valeurs d’impédance de chaque composant, qui peuvent être obtenues à partir des fiches techniques des fabricants, doivent être additionnées algébriquement pour déterminer la charge totale. Les unités de mesure doivent être les mêmes et de préférence sous la forme complexe $R + jX$ [3]. Le tableau 2.1 présente des valeurs typiques de charges pour divers dispositifs utilisés à 120 V et 60 Hz [3, 25].

2.6 Technologies des transformateurs de mesure de tension

2.6.1 Transformateur de Tension Inductif (TTI)

Il s’agit d’un dispositif conventionnel utilisant une bobine à inductance magnétique saturable. Son principal objectif est de fournir une puissance extrêmement faible à son enroulement secondaire. Nous concentrons notre étude sur ce type de transformateurs, car il constitue l’élément central de notre recherche, sur lequel nous fournissons des détails par la suite [7].

TABLE 2.1 – Valeurs de la charge pour les dispositifs courants [3]

Appareil	TTs		TCs	
	Charge (VA)	FP	Charge (VA)	FP
Voltmètre	0,1	0,7	-	-
Ampèremètre	-	-	0,1-15	0,4 - 1,0
Wattmètre	1-20	0,3-1,0	0,5-25	0,2-1,0
FP mètre	3-25	0,8-1,0	2-6	0,5-0,95
Fréquence-mètre	1-50	0,7-1,0	-	-
kWh-mètre	2-50	0,5-1,0	0,25-3	0,4-0,95
Relais	0,1-50	0,3-1,0	0,1-150	0,3-1,0
Régulateur	50-100	0,5-0,9	10-180	0,5-0,95

2.6.2 Transformateurs de tension capacitif (TTC)

Le diviseur à condensateur est souvent constitué d'un empilement d'éléments de condensateur identiques, ce qui donne directement une distribution uniforme de la tension. Le diviseur à condensateur pur peut être équipé d'une prise à la base, comme le montre la figure 2.3a, pour fournir un signal de détection de 100 à 120 V, **il n'est utile que pour l'indication de la tension** car l'erreur d'angle de phase atteindra des valeurs inacceptables pour des charges (puissances) de 1 W. Pour résoudre ce problème, le transformateur de tension à condensateur (TTC) a été mis au point [26].

Dans le monde entier, environ 90 % des mesures de tension dans les équipements de commutation extérieurs à haute tension¹ sont réalisées à l'aide de transformateurs de tension capacitifs (TTC). Cependant, en Europe, certaines applications préfèrent les transformateurs de tension magnétiques en raison de leur fiabilité et de leur précision. Un avantage important de ces transformateurs est qu'ils fonctionnent soit correctement, soit pas du tout [24].

Comme illustré sur la figure 2.3b, ces transformateurs se composent de quatre éléments principaux à savoir [26] :

- Le diviseur de tension à condensateur C_1 et C_2 ;
- La réactance de compensation L ;
- Transformateur de tension intermédiaire (IVT) avec son enroulement secondaire S ;
- Les circuits auxiliaires F pour l'amortissement de la ferrorésonance et T pour obtenir les performances transitoires requises. Le comportement transitoire souhaité peut parfois être obtenu sans l'utilisation de circuits auxiliaires.

1. appareil de commutation utilisé pour connecter ou déconnecter une partie d'un réseau électrique à haute tension

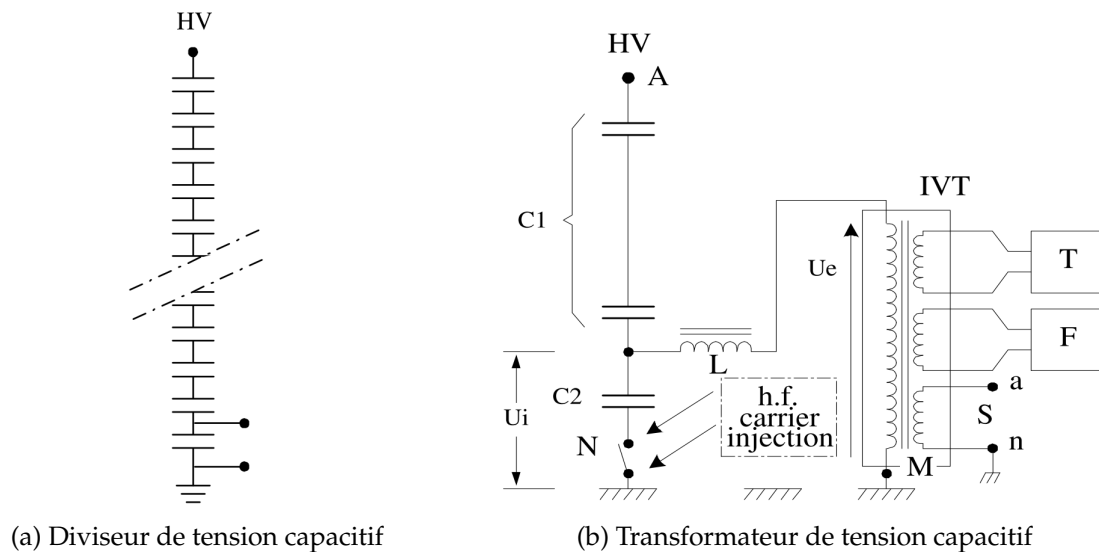


FIGURE 2.3 – Évolution du TTC [26]

Le diviseur de tension à condensateur a un point chaud pour fournir une tension d'entrée U_i qui est généralement de 10 à 20 kV par rapport à la terre. Si une charge était directement connectée au point chaud, le déphasage de la tension aux bornes de ce point changerait de manière significative avec la variation de la charge. L'inductance de la réactance L réduit cette variation d'erreur de phase à une valeur spécifiée acceptable (pratiquement nulle) pour la tension d'entrée U_e de l'IVT [26].

2.6.3 Transformateur de tension résistif

Les premières expériences de mesure de tension avec des diviseurs résistifs ont été réalisées dans le domaine des hautes tensions continues pour l'alimentation des accélérateurs d'électrons et d'ions entre 1955 et 1975 [27].

En pratique, deux technologies de diviseurs résistifs ont été utilisées. Le diviseur R compensé utilisé pour les tensions de 1 à 52 kVrms AC et DC, avec compensation des capacités de terre par des mesures de conception. Le diviseur RC est utilisé pour les tensions alternatives de 52 à 1200 kVrms et pour les tensions continues jusqu'à 4000 kV, avec des résistances et des condensateurs connectés en parallèle [24].

2.6.4 Transformateur de tension optique (TTO)

La fonction principale d'un TTO est la mêmes que pour un TT conventionnel, à savoir la fonction d'isolation et la fonction de détection. Dans ce cas, le lien entre le transducteur de l'instrument et la sortie secondaire du transformateur **n'est plus direct**. La liaison entre le capteur et la basse tension est assurée par des convertisseurs optiques et des canaux de fibres. En outre, ces convertisseurs doivent communiquer entre eux. Comme le montre la figure 2.4, les symboles E/O et O/E font référence à la conversion électrique-optique et optique-électrique des signaux des capteurs transférés via la liaison de communication [26].

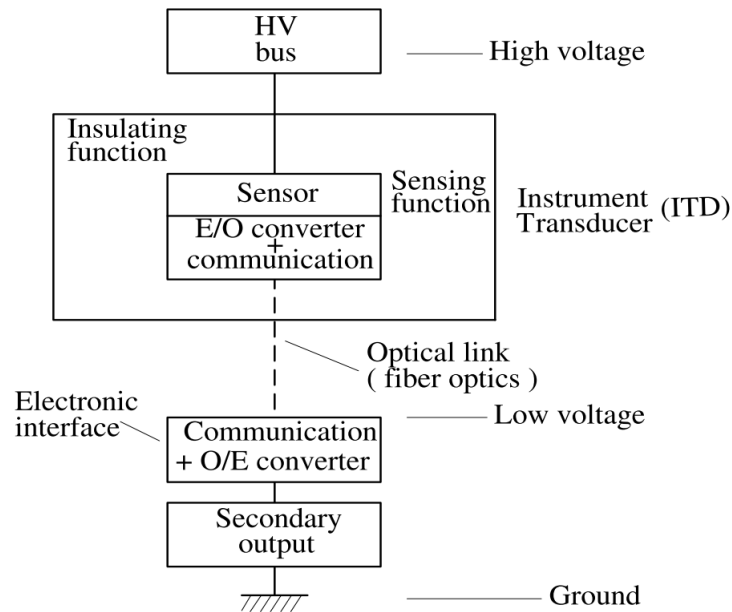


FIGURE 2.4 – Schéma fonctionnel du transducteur de l'instrument [26]

2.7 Normes industrielles

En Europe, l'industrie des transformateurs de mesure s'appuie fortement sur la norme CEI 61869-1, *Instrument transformers Part 1 : General requirements (Exigences pour les transformateurs de mesure)* [4]. Cette norme établit la base des tests et de la fabrication de tous les transformateurs de mesure utilisés dans le continent et dans le monde entier. La mondialisation du marché s'accompagne d'une volonté d'harmonisation des normes avec la CEI. Il est important de connaître les normes internationales en vigueur, dont les plus courantes sont énumérées dans le tableau 2.2. La plupart des grands pays ont à l'origine développé leurs propres normes. Aujourd'hui, un certain nombre d'entre eux ont adopté les normes de la CEI (citées dans tableau 2.3) pour remplacer les leurs, en partie ou en totalité [3].

2.8 Normes CEI dédiées aux transformateurs de mesure

En industrie, il est crucial d'adopter des règles communes pour la conception, la construction, l'approvisionnement, la maintenance et le fonctionnement des équipements, afin de garantir la compatibilité entre les équipements d'un même secteur et d'assurer un niveau de qualité et de sécurité élevé. Ces règles sont généralement énoncées sous forme de normes techniques qui servent de base aux constructeurs pour garantir certaines caractéristiques lors de la réalisation d'un produit. Les normes peuvent également inclure des recommandations sur l'utilisation de certains matériels.

Ainsi, toutes les entreprises, y compris SADTEM, doivent respecter les normes relatives aux équipements qu'elles fabriquent pour réduire les obstacles aux échanges

TABLE 2.2 – Normes de transformateur de mesure

Pays	Norme TC	Norme TT
États Unies	IEEE C57.13	IEEE C57.13
	IEEE C57.13.6	IEEE C57.13.6
	ANSI C12.11	ANSI C12.11
Canada	CSA C61869-2	CSA C61869-3
IEC	IEC 61869-2 ex IEC 60044-1	IEC 61869-3 ex IEC 60044-2
Royaumes Uni	BS 60044-1	BS 60044-2
Australie	AS 60044-1 ex AS 1675	AS 60066-2 ex AS 1243
Japan	JIS C 1731 and C 1731-1	JIS C 1731 and C 1731-2
	JIS C 1736 and C 1736-1	JIS C 1736 and C 1736-2

commerciaux et bénéficier d'un avantage économique.

Le présent mémoire se concentrera principalement sur les normes CEI 61869-1 et -3 relatives aux transformateurs de mesure. Ces normes établissent de nombreux critères, tels que des garanties de tenue à certains essais rigoureux et d'isolement interne. En effet, nous nous concentrerons sur les notions liées à la réalisation de notre projet.

2.8.1 Présentation de la CEI



International
Electrotechnical
Commission

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de tous les Comités nationaux de la CEI. L'objectif de la CEI est de promouvoir la coopération internationale sur toutes les questions liées à la normalisation dans les domaines électrique et électronique. À cette fin, la CEI publie notamment des normes internationales, des classifications techniques, des rapports techniques, des classifications d'accès publique (PAC) et des guides. Leur élaboration est confiée à des comités de recherche, aux activités desquels peut participer tout comité national intéressé par le sujet. Des organisations

internationales, gouvernementales et non gouvernementales, participent aux travaux en coordination avec la CEI. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.

2.8.2 La norme CEI 61869-1 : Exigences générales pour transformateurs de mesure

Le comité d'études 38 de la CEI a établi la norme internationale [4] : Transformateurs de mesure. Le 38e comité d'études a décidé de reconstruire les normes indépendantes de la série CEI 60044 et de les remplacer par une nouvelle série de normes composée de documents d'exigence généraux et spécialisés. La norme actuelle, qui est la première de cette nouvelle série, peut être considérée comme une norme de famille de produits. Elle comprend des exigences générales pour les transformateurs de mesure et doit être lue en conjonction avec les normes d'exigences appropriées pour le transformateur de mesure en question.



2.8.2.1 Aperçu de l'ensemble des normes complémentaires

Les normes complémentaires ou de famille pouvant accompagner la CEI 61869-1 sont énumérées dans le tableau 2.3 [4].

2.8.2.2 Organisation de la norme

La norme CEI 61869-1 ainsi que toutes ses normes complémentaires traitent les points suivants :

- Domaine d'application ;
- Références normatives ;
- Termes et définitions ;
- Conditions de service normales et spéciales ;
- Caractéristiques assignées ;
- Conception et construction ;
- Essais.

TABLE 2.3 – Normes de la famille CEI 61869-1

Normes de famille de produit	Normes produits	Produits	Anciennes Normes
61869-1 Exigences générales pour transformateurs de mesure	61869-2	Transformateurs de courant	60044-1
	61869-3	Transformateurs de tension	60044-2
	61869-4	Transformateurs combinés	60044-3
	61869-5	Transformateurs capacitifs de tensions	60044-6
	61869-6	Transformateurs de courant pour la reponse en regime transitoire	60044-7
	61869-7	Transformateurs de tension electroniques	60044-8
	61869-8	Transformateurs de courant electroniques	
	61869-10	Capteurs de courant basse puissance independants	

2.8.3 La norme CEI 61869-3 : Exigences supplémentaires concernant les transformateurs inductifs de tension

La présente norme remplace celle 60044-2 relatives aux transformateurs inductifs de tension. Elle constitue la Partie 3 de la CEI 61869, publiée sous le titre général : Transformateurs de mesure, et doit être lue en conjonction avec la CEI 61869-1, Exigences générales - première édition (2007), sur laquelle elle est basée.

2.8.3.1 Domaine d'application

La norme internationale CEI 61869-3 s'applique aux transformateurs de mesure de construction récente. Ces transformateurs sont équipés d'une sortie analogique ou numérique, et destinés à être utilisés avec des appareils de mesure électriques ou des dispositifs de protection électriques de fréquences assignées comprises entre 15 Hz et 100 Hz [5].

2.8.4 Termes, définitions et abréviations

Les termes, les définitions ainsi que les abréviations utilisés dans cette section sont tirés de la norme CEI 61869-3 [5].

2.8.4.1 Définitions générales

Transformateur de tension : transformateur de mesure dans lequel la tension secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle quasiment nul, pour un sens approprié des connexions.

Transformateur de tension pour mesure : transformateur de tension destiné à transmettre un signal d'information à des appareils de mesure, des compteurs et autres appareils analogues.

2.8.4.2 Définitions liées aux caractéristiques diélectriques

Tension primaire assignée U_{pr} : valeur de la tension primaire qui figure dans la désignation du transformateur et d'après laquelle sont déterminées ses conditions de fonctionnement.

Tension secondaire assignée U_{sr} : valeur de la tension secondaire qui figure dans la désignation du transformateur et d'après laquelle sont déterminées ses conditions de fonctionnement.

Tension la plus élevée d'un réseau U_{sys} : valeur la plus élevée de la tension de service entre phases (valeur efficace) qui se présente à un instant et en un point quelconque du réseau dans des conditions d'exploitation normales.

Tension la plus élevée pour le matériel U_m : la valeur efficace la plus élevée de la tension entre phases pour laquelle le matériel est spécifié en ce qui concerne son isolement ainsi que certaines autres caractéristiques qui sont éventuellement rattachées à cette tension dans les normes proposées pour chaque matériel.

Niveau d'isolement assigné : combinaison des valeurs de tension qui caractérise l'isolation d'un transformateur en ce qui concerne son aptitude à résister aux contraintes diélectriques.

2.8.4.3 Définitions liées à la précision

Rapport de transformation réel k : rapport entre la tension ou le courant primaire réel(le) et la tension ou le courant secondaire réel(le).

Rapport de transformation assigné k_r : rapport entre la tension ou le courant primaire assigné(e) et la tension ou le courant secondaire assigné(e).

$$k_r = \frac{U_{pr}}{U_{sr}} \quad (2.1)$$

Erreur de rapport ϵ : l'erreur qu'un transformateur de mesure introduit dans la mesure et qui résulte du fait que le rapport de transformation réel n'est pas égal au rapport de transformation assigné. Exprimée en pour-cent, elle est donnée par la formule :

$$\epsilon = \frac{k_r U_s - U_p}{U_p} \times 100 \quad (2.2)$$

avec :

- k_r est le rapport de transformation assigné ;
- U_p est la tension primaire réelle ;
- U_s est la tension secondaire réelle correspondant à la tension U_p dans les conditions de la mesure.

Déphasage $\Delta\phi$: c'est la différence de phase entre les vecteurs de Fresnel de la tension ou du courant primaire et de la tension ou du courant secondaire. Le sens des vecteurs est choisi de telle sorte que l'angle soit de zéro pour un transformateur idéal. Ce déphasage est généralement exprimé en minutes ou centiradians et donné par la formule suivante :

$$\Delta\phi = \arg(\overline{U_s}) - \arg(\overline{U_p}) \quad (2.3)$$

Classe de précision : désignation appliquée à un transformateur de mesure dont l'erreur de rapport et le déphasage restent dans des limites spécifiées, pour les conditions d'emploi prescrites.

Charge : admittance (ou impédance) du circuit secondaire, exprimée en siemens (ou ohms), et facteur de puissance.

Charge assignée : valeur de la charge à laquelle sont rapportées les exigences de précision de cette spécification.

Puissance de sortie assignée S_r : valeur de la puissance apparente (en volt-ampères à un facteur de puissance spécifié) que le transformateur peut fournir au circuit secondaire à la tension ou au courant secondaire assigné lorsqu'il est raccordé à sa charge assignée.

2.8.5 Grandeurs assignées au transformateur de tension

Afin de caractériser de manière normalisée un transformateur de mesure, on attribue à chaque grandeur une valeur normale de la gamme correspondante, conformément à la norme CEI 61869-3 [5].

2.8.5.1 Niveaux de tension primaire

Les tensions primaires sont réparties en gamme et présentées dans le tableau 2.4 [16].

TABLE 2.4 – Gammes de tension primaire [16]

gamme	plage de tension
A	$1kV < U_m < 52kV$
B	$52kV < U_m < 300kV$
C	$300kV$

2.8.5.2 Puissance de sortie de précision

C'est la puissance de la charge connectée au secondaire où la précision est garantie. La gamme de cette puissance est présentée dans le tableau 2.5 [5].

TABLE 2.5 – Gammes de charge [5]

$\cos(\phi) = 1$	1,0 - 2,5 - 5,0 - 10 VA
$\cos(\phi) = 0,8$ (circuit inductif)	10 - 25 - 50 - 100 VA

2.8.5.3 Classe de précision assignée

La classe de précision (tableau 2.6) des transformateurs de tension pour mesures est définie par un nombre appelé indice de classe représentant la limite d'erreur admissible en pourcentage pour la tension primaire assignée et la charge de précision. Cette classe de précision doit être respectée à la fréquence assignée. Elle est associée à une limite d'erreur de tension et de déphasage à ne pas dépasser pour une tension située entre 80% et 120% de la valeur nominale assignée, ainsi qu'une charge comprise dans les plages suivantes :

- 0 VA à 100% de la charge de précision avec un facteur de puissance de 1.
- 25% à 100% de la charge de précision avec un facteur de puissance de 0,8 inductif.

Ainsi, les classes de précision normales pour les transformateurs inductifs de tension monophasés sont représentés dans le tableau 2.6 [5].

TABLE 2.6 – Gammes de précision[5]

Classe	Erreur de rapport (tension) ϵ_u en %	Déphasage $\Delta\phi$	
		Minutes	Centiradians
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	pas de limite	pas de limite

2.8.5.4 Tension secondaire assignée

Pour les transformateurs monophasés, la tension secondaire est choisie selon la pratique et l'endroit où l'équipement doit être utilisé (Tableau 2.7) [5].

TABLE 2.7 – Gammes de tension secondaire [5]

Pratique courante en Europe	100 V et 110 V ; 200 V pour les circuits secondaires étendus.
Pratique courante aux États-Unis et au Canada	120 V pour les réseaux de distribution ; 120 V pour les réseaux de distribution ; 230 V pour les circuits secondaires étendus.
<p>NOTE Pour les transformateurs monophasés destinés à être montés en phase et terre dans les réseaux triphasés, pour lesquels la tension primaire assignée est un nombre divisé par $\sqrt{3}$, la tension secondaire assignée doit être l'une des valeurs mentionnées ci-dessus, divisée par $\sqrt{3}$ de manière à conserver la valeur du rapport de transformation assigné.</p>	

2.8.5.5 Valeurs normales du facteur de tension assigné

Le facteur de tension est déterminé par la tension maximale de fonctionnement, laquelle dépend à son tour du réseau et des conditions de mise à la terre de l'enroulement primaire du transformateur. Autrement dit, c'est la tension maximale que doit supporter le transformateur de mesure pendant une durée de temps déterminée (Tableau 2.8) [5].

TABLE 2.8 – Gammes de facteur de tension [5]

Facteur de tension assigné	Durée assignée	Mode de connexion de l'enroulement primaire et conditions de mise à la terre du réseau
1,2	Continue	Entre phases d'un réseau quelconque ; Entre point neutre de transformateurs en étoile et terre dans un réseau quelconque.
1,2	Continue	Entre phase et terre dans un réseau à neutre effectivement à la terre (CEI 61869-1 :2007, 3.3.7a)
1,5	30 s	
1,2	Continue	Entre phase et terre dans un réseau à neutre non effectivement à la terre (CEI 61869-1 :2007, 3.3.7b) avec élimination automatique du défaut à la terre
1,9	30 s	
1,2	Continue	Entre phase et terre dans un réseau à neutre isolé (CEI 61869-1 :2007, 3.3.4) sans élimination automatique du défaut à la terre, ou dans un réseau compensé par bobine d'extinction (CEI 61869-1 :2007, 3.3.5) sans élimination automatique du défaut à la terre
1,9	8h	

2.9 Transformateur de tension inductif(TTI)

2.9.1 Principe de base

Un transformateur de tension inductif conventionnel est un transformateur avec un enroulement secondaire ouvert. La tension secondaire U_2 est proportionnelle à celle primaire U_1 et au rapport entre le nombre de spires de l'enroulement secondaire N_2 et celui primaire N_1 . La tension secondaire peut être calculée comme suit : $U_2 = U_1 \cdot N_2 / N_1$. La précision du transformateur de tension dépend de la taille du noyau de fer, de la résistance de l'enroulement primaire, de l'inductance de fuite et de la charge connectée.

2.9.2 Circuit équivalent

La figure 2.5 montre le schéma équivalent du transformateur de tension inductif, ramené au côté secondaire. L'enroulement primaire est représenté par la résistance ohmique R'_1 de l'enroulement primaire et l'inductance de fuite X'_1 , l'enroulement secondaire par la résistance ohmique R_2 de l'enroulement secondaire et l'inductance de fuite secondaire X_2 . Le comportement du noyau de fer est représenté par l'inductance principale X_m et les pertes ohmiques du noyau R_0 . L'impédance de la charge externe est représentée par la partie ohmique R_L et la partie inductive X_L . Les valeurs primaires sont converties du côté secondaire comme suit [25] :

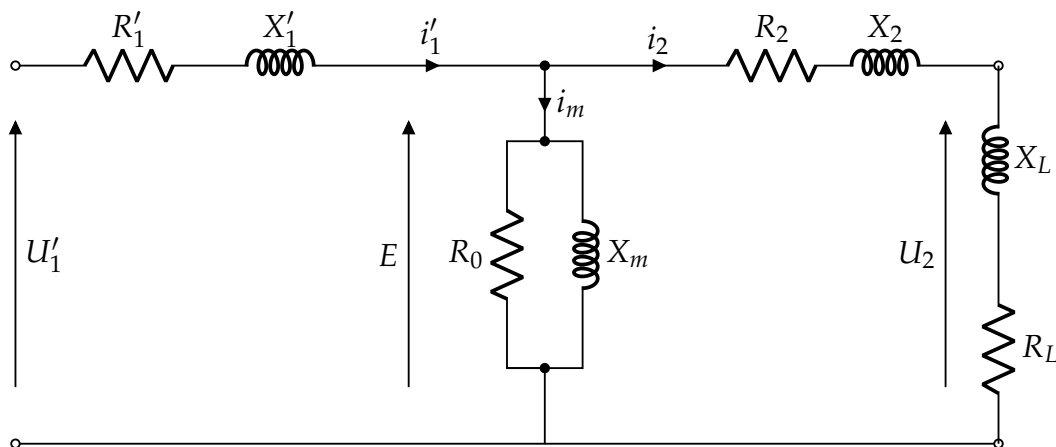


FIGURE 2.5 – Circuit équivalent ramené au secondaire

$$U'_1 = U_1 \frac{N_2}{N_1} = U_1 m \quad (2.4)$$

$$I'_1 = I_1 \frac{N_2}{N_1} = I_1 m \quad (2.5)$$

$$R'_1 = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = R_1 m^2 \quad (2.6)$$

$$X'_1 = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = X_1 m^2 \quad (2.7)$$

m étant le rapport de transformation = $\frac{N_2}{N_1}$

2.9.3 Diagramme de phase

Le diagramme de phases est un élément essentiel dans notre étude, car il permet une identification claire et simple des différents éléments du schéma équivalent et des erreurs qu'ils peuvent engendrer. Étant donné que nos tests nécessitent une très grande précision, il est crucial d'identifier tous les éléments du schéma afin de garantir une classification de précision fine. Ce diagramme nous permet, en particulier, de déterminer l'erreur d'amplitude ΔU et le déphasage $\Delta \phi$ d'un transformateur inductif de tension (Figure 2.6).

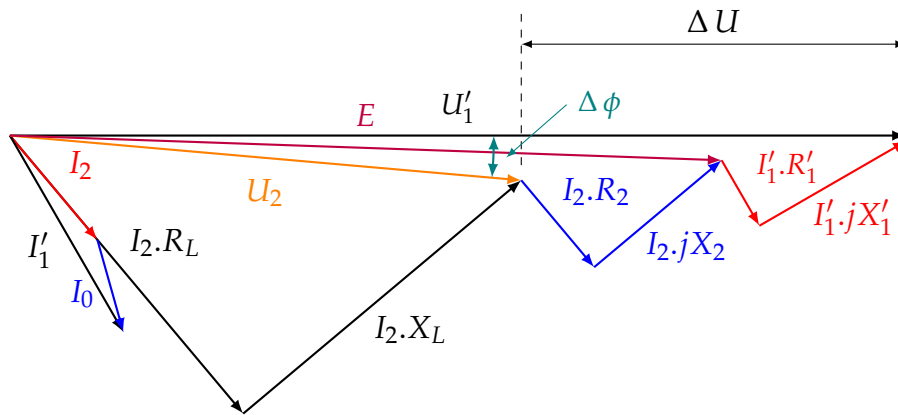


FIGURE 2.6 – Diagramme de phase selon le circuit équivalent de la figure 2.5

La tension secondaire U_2 appliquée à la charge définit le courant secondaire I_2 . Ce courant traverse l'enroulement secondaire et entraîne une chute de tension. Cette chute de tension s'ajoute à la tension secondaire, formant ainsi une FEM E . La FEM E génère à son tour le courant magnétisant I_m , qui est ajouté au courant secondaire pour former le courant primaire I'_1 . Ce processus crée une chute de tension supplémentaire au niveau de l'enroulement primaire. L'erreur du transformateur de tension est composée de **la chute de tension au niveau des enroulements primaire et secondaire**, représentée dans le diagramme de phase par l'erreur d'amplitude ΔU et le déphasage $\Delta \phi$ [24].

2.10 Mode de défaillance

2.10.1 Phénomène de court-circuit au secondaire

En cas de court-circuit de l'enroulement secondaire du transformateur, la température peut augmenter rapidement, ce qui peut conduire à une explosion du

transformateur. Toutefois, conformément aux normes et exigences définies par [5], ces transformateurs doivent être capables de résister à un court-circuit d'une durée de 1 s.

2.10.2 Contrainte diélectrique sur l'enroulement primaire

Une des contraintes importantes à considérer d'un transformateur de mesure est les décharges partielles. Lors du dimensionnement d'un transformateur de mesure, il est nécessaire de prendre en compte l'isolation entre spires de l'enroulement primaire. Selon la norme [5], un TTI doit résister à un niveau de tension de 3000V entre couche U_{DL} (Figure 2.7). Cela revient à choisir un isolant et une épaisseur adéquats entre les spires.

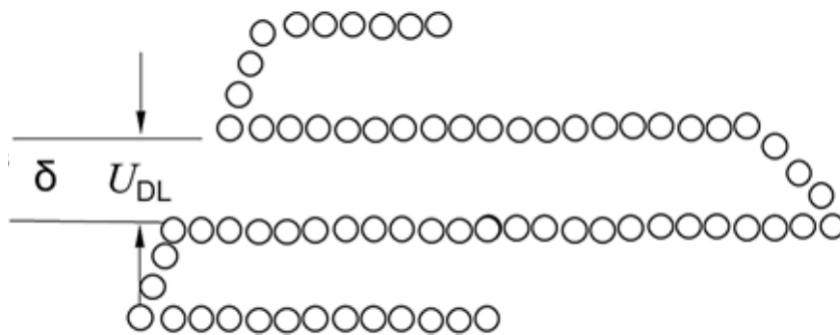


FIGURE 2.7 – Tension U_{DL} entre spires

2.11 Calcul d'erreurs d'un TTI

La classe de précision est, en effet, la caractéristique fondamentale d'un transformateur de mesure. Elle correspond généralement à un paramètre compris entre 0,2 et 3 %. Cependant, une telle précision ne peut être atteinte que si des corrections adéquates sont apportées au transformateur de mesure. Par conséquent, il est essentiel d'évaluer avec soin toutes les erreurs potentielles afin de pouvoir effectuer les corrections nécessaires ultérieurement. Il est important de rappeler que les normes [4, 5] et les méthodes utilisées pour attribuer une classe de précision sont valables uniquement pour les fréquences de 50 Hz et 60 Hz. Au-delà de ces fréquences, il n'existe actuellement aucune norme couvrant une large bande de fréquences. Cependant, il est à noter que la CEI (Commission électrotechnique internationale) prépare actuellement la publication imminente d'une norme qui couvrira des fréquences d'utilisation plus élevées.

2.11.1 Calcul d'erreur de rapport ϵ_k

Selon la CEI 61869-3 [5], l'erreur de rapport est définie comme (voir section 2.8.4.3) :

$$\epsilon_K = \frac{K_r U_S - U_P}{U_P} \times 100\% \quad (2.8)$$

2.11.2 Erreur à vide

Tant qu'aucune charge n'est connectée aux bornes secondaires, le courant de magnétisation I_m circule dans l'enroulement primaire. Il en résulte une chute de tension au niveau de l'enroulement primaire. Cette chute de tension représente l'erreur à vide du transformateur de tension, car la tension aux bornes secondaires est inférieure à la tension primaire en raison de cette chute de tension. Dans ce cas, $U_2 = E$ et $I'_1 = I_m$. Sur figure 2.10, est représenté le diagramme de phase de l'erreur à vide.

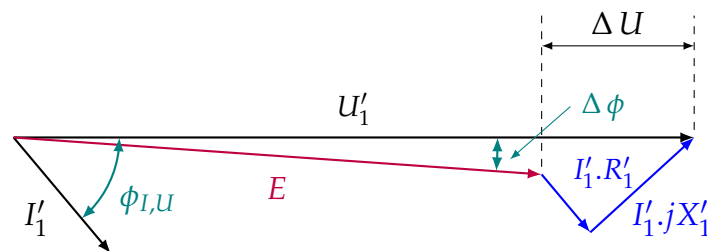


FIGURE 2.8 – Diagramme de phase selon le circuit équivalent à vide

L'équation électrique à vide est :

$$U'_1 = E + \overline{I'_1} \cdot R'_1 + \overline{I'_1} \cdot j X'_1 \quad (2.9)$$

On peut alors facilement tirer la formule d'erreur à partir du diagramme de la figure 2.8 :

$$\epsilon_K^{vide} = \frac{\Delta U}{E} \times 100\% \quad (2.10)$$

2.11.3 Erreur en charge

En connectant une charge à l'enroulement secondaire, un courant secondaire I_2 circule. Ce qui entraîne une chute de tension supplémentaire dans les enroulements primaire et secondaire et augmente donc l'erreur du transformateur de tension.

En reprenant le diagramme sur la figure 2.6, l'erreur en charge ϵ_K^{charge} se calcule également par la formule 2.10 [25].

2.11.4 Erreur globale

A une charge donnée, l'erreur totale est comme suit :

$$\epsilon_K^{tot} = \epsilon_K^{vide} + \epsilon_K^{charge} \quad (2.11)$$

2.11.5 Attribution d'une classe précision à un TTI

D'une manière simple et pratique, valider une classe de précision d'un transformateur revient à compléter le tableau 2.9. Nous prenons, à titre d'exemple, la classe 0,2 avec un $\cos(\phi) = 0,8$. Alors, pour attribuer la classe 0,2 au transformateur, il est impératif que les 12 tests mentionnés dans le tableau 2.9 soient appliqués et validés. Si l'un de ces tests échoue, la classe ne sera pas attribuée au transformateur.

TABLE 2.9 – Validation d'une classe de précision

Charge	Tension d'alimentation à 50 ou 60 Hz		
	$0,8 U_n$	U_n	$1,2 U_n$
$1/4 \times P_n$	$ \epsilon_K < 0,2\%$	$ \epsilon_K < 0,2\%$	$ \epsilon_K < 0,2\%$
	$ \Delta\phi < 10 \text{ min}$	$ \Delta\phi < 10 \text{ min}$	$ \Delta\phi < 10 \text{ min}$
$4/4 \times P_n$	$ \epsilon_K < 0,2\%$	$ \epsilon_K < 0,2\%$	$ \epsilon_K < 0,2\%$
	$ \Delta\phi < 10 \text{ min}$	$ \Delta\phi < 10 \text{ min}$	$ \Delta\phi < 10 \text{ min}$

2.12 Analyse d'erreur d'un TTI à haute fréquence

L'étude des transformateurs de mesure à large bande de fréquence est un domaine de recherche très récent. Le besoin de mesurer les tensions à haute fréquence est né de l'intérêt croissant des industriels pour évaluer la qualité de l'énergie et la pollution du réseau électrique. Ces deux éléments ont un impact économique considérable tant pour les fournisseurs que pour les consommateurs d'électricité.

Pour répondre à ce besoin, de nombreuses recherches ont été menées pour identifier l'effet de la fréquence sur le rapport de transformation [28, 29] et, par conséquent, sur l'erreur associée (erreur de rapport ϵ_k). De plus, de nombreuses méthodes ont été développées pour corriger les erreurs liées aux hautes fréquences [28, 30-34].

Ces travaux de recherche visent à mieux comprendre les comportements des transformateurs de mesure dans des conditions de fréquences élevées et à développer des techniques permettant de compenser ces erreurs. L'objectif ultime est de garantir des mesures précises et fiables, même à des fréquences élevées, afin de contribuer à l'amélioration de la qualité de l'énergie et à la gestion efficace du réseau électrique.

2.12.1 Phénomène de la non-linéarité d'un transformateur inductif (TI)

L'une des limites de l'utilisation de transformateurs inductifs conventionnels dans les applications de fréquence du réseau électrique est la non-linéarité introduite par leur noyau de fer. Deux conséquences d'une telle non-linéarité ont été

démonstrées par [28] et sont brièvement discutées dans ce qui suit.

La première peut être observée en comparant le comportement de la fréquence de l'erreur de rapport mesurée sous des amplitudes croissantes de basse tension appliquée de quelques dizaines à quelques centaines de volts (Figure 2.9) et le comportement obtenu avec une tonalité fondamentale à la tension nominale avec un balayage de fréquence harmonique superposé (Figure 2.9, courbe FH1). Lorsque le transformateur est alimenté à basse tension, l'aimantation du noyau de fer est faible par rapport au point de fonctionnement nominal, d'où les pertes de fer, qui dépendent de la tension d'alimentation et de la fréquence d'alimentation. Les effets du noyau de fer peuvent être introduits dans un modèle circulaire commun d'un transformateur en sélectionnant, pour chaque fréquence d'alimentation, une valeur différente de l'inductance de magnétisation et de la résistance qui émule les pertes réelles. Avec l'augmentation de la fréquence, l'effet des capacités parasites, entre les spires et entre les enroulements et la terre, commence à prédominer sur les effets non-linéaires, comme le montre la figure 2.9 où, au-delà d'une certaine fréquence, le comportement de l'erreur de rapport peut être considéré comme indépendant de la tension d'alimentation.

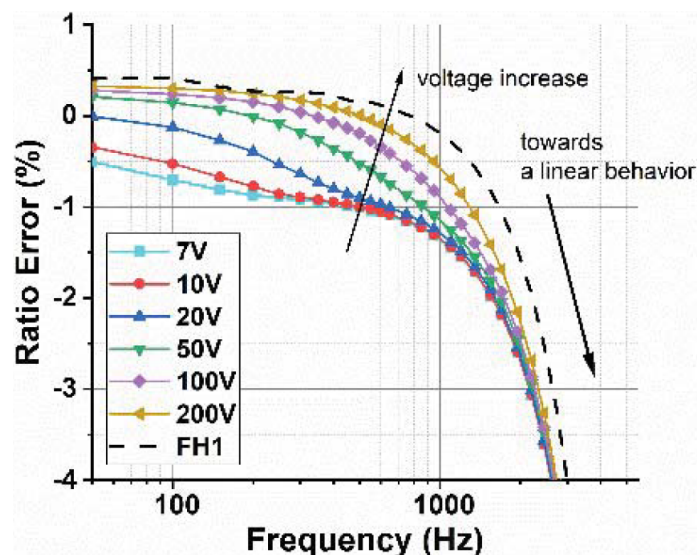


FIGURE 2.9 – Erreur de rapport en fréquence obtenue avec différentes amplitudes de basse tension et réponse du FH1 (réponse en fréquence de référence mesurée à la tension nominale plus harmonique) [28].

La deuxième conséquence est visible jusqu'aux premières harmoniques, lorsque la tension d'alimentation nominale est appliquée. Nous pouvons noter que l'erreur de rapport obtenue en appliquant la tension d'alimentation nominale de 50 Hz avec une troisième harmonique superposée en fonction de l'angle de phase par rapport à la tension d'alimentation nominale montre un comportement sinusoïdal (Figure 2.10). Cet effet est dû à la combinaison de l'harmonique appliquée à l'entrée du transformateur de tension (TT) et de l'harmonique générée par la tonalité fondamentale en raison de la non-linéarité de la courbe B-H du TT.

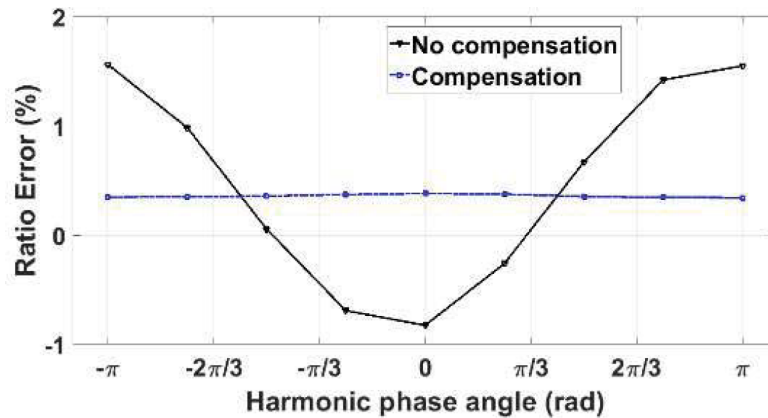


FIGURE 2.10 – Erreur de rapport associée à la troisième harmonique appliquée en fonction de son déphasage sans et avec la méthode de compensation SINDICOMP [28].

2.12.2 Test de référence de l'INRIM : FH1

En Italie, l'Institut National de Recherche Métrologique (INRIM) mène d'importantes recherches visant à améliorer les performances métrologiques des transformateurs de mesure, en particulier. Les chercheurs proposent dans la plupart de leurs travaux des méthodes de compensation numérique de la précision à haute fréquence [28, 31-33].

Dans le cadre de ces recherches, un équipement de mesure de référence a été développé pour soutenir les différentes études menées au sein du laboratoire. Cet équipement permet la caractérisation de la fréquence de l'énergie électrique des transformateurs de tension (TT) ou de courant (TC), impliquant la génération d'un signal de moyenne tension (MT) déformé.

Le signal de tension appliqué est composé d'une tonalité fondamentale et d'une tonalité harmonique (FH1). La tonalité fondamentale a une amplitude comprise entre 80 % et 120 % de la tension nominale primaire du transformateur, tandis que l'amplitude de la tonalité harmonique est de 1 % de la tonalité fondamentale. La fréquence de la tonalité fondamentale est fixée à 50 Hz, tandis que la fréquence harmonique varie de 50 Hz à 10 kHz. Entre la tonalité fondamentale et la tonalité harmonique, plusieurs retards de phase de l'ordre de $\pm\pi$ rad peuvent être imposés.

2.12.3 Compensation de la non-linéarité du circuit magnétique des TIs par la méthode SINDECOMPE

2.12.3.1 Principe de la méthode

La méthode SINDECOMPE vise à caractériser et à améliorer les performances métrologiques des transformateurs de courant et de tension dans les mesures d'harmoniques dans le système électrique.

Il a été démontré à travers une analyse théorique [28] qu'en raison de la non-linéarité du noyau de fer (voir section 2.12.1), le signal de sortie des TC et des

TT a été **le même lorsque le signal d'entrée est une onde sinusoïdale pure**. Ainsi, des erreurs remarquables sont introduites dans la mesure des composantes harmoniques.

À partir de cette analyse, une nouvelle méthode de caractérisation et de compensation des TC et des TT est proposée. On suggère d'utiliser des formes d'onde d'essai constituées de la composante fondamentale et d'une composante harmonique, dans le but d'étudier l'impact de l'amplitude et de la phase des harmoniques sur les performances métrologiques des transducteurs, à la fois aux fréquences fondamentales et aux fréquences harmoniques.

Dans un premier temps, les transformateurs ont été caractérisés dans des conditions sinusoïdales et les phasors harmoniques de la sortie déformée ont été mesurés. Dans un deuxième temps, ces phasors sont utilisés pour compenser les phasors harmoniques mesurés dans des conditions de fonctionnement normales (sinusoïde et harmonique), qui sont généralement déformés. La technique de caractérisation et de compensation proposée est appelée : **SINusoidal characterization for DIstortion COMPensation (SINDICOMP)** [28].

2.12.3.2 Résultats de la méthode

Plusieurs essais expérimentaux, utilisant des dispositifs d'étalonnage de haute précision, ont été réalisés pour vérifier les méthodes proposées. Les résultats expérimentaux présentés dans le tableau 2.10 ont montré que la technique SINDICOMP assure une amélioration significative des performances métrologiques des TC et des TT dans les mesures d'harmoniques.

2.12.3.3 Limite de la méthode

La méthode est valable seulement pour les premières harmoniques (jusqu'à l'harmonique 7). Cependant, d'autres méthodes basées sur celle-ci [31, 32], ont été développées pour arriver à d'autres fréquences.

2.12.4 Procédure simplifiée pour l'identification précise de la réponse en fréquence des TTs

2.12.4.1 Principe de la méthode

Des recherches récentes ont été menées à l'INRIM pour développer une méthode de calcul précise et peu coûteuse de l'erreur. À partir des résultats de la méthode SINDICOMP, une approche a été élaborée en vue de construire une réponse en fréquence approximative **jusqu'à la première fréquence de résonance** [31]. Il s'agit d'une procédure de mesure en deux étapes. Chacune d'elles implique la génération d'ondes sinusoïdales uniquement, de sorte qu'elle peut être facilement réalisée dans les laboratoires d'étalonnage des transformateurs de mesure sans nécessiter de fonctions de génération supplémentaires.

La première étape consiste à mesurer à 50 Hz l'erreur de rapport du transformateur de tension à la tension nominale. La deuxième étape consiste en un balayage

TABLE 2.10 – Valeurs absolues des erreurs de rapport et de phase du TT et TC à chaque ordre harmonique, avec et sans compensation/charge [28]

			Harmonic Order						
			2	3	4	5	6	7	
CT	Burden 12 %	Max Ratio Error [%]	Uncompensated	0.755	1.098	0.111	0.159	0.061	0.066
			Compensated	0.089	0.083	0.072	0.065	0.057	0.057
			Expanded Uncertainty (99 %)	0.014	0.014	0.013	0.014	0.014	0.012
		Max Phase Error [mrad]	Uncompensated	9.78	11.77	1.25	1.29	0.29	0.69
			Compensated	3.29	1.93	0.90	0.37	0.20	0.30
			Expanded Uncertainty (99 %)	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.12
	Burden 100 %	Max Ratio Error [%]	Uncompensated	0.903	1.380	0.095	0.191	0.040	0.084
			Compensated	0.060	0.064	0.052	0.154	0.037	0.042
			Expanded Uncertainty (99 %)	0.012	0.013	0.011	0.012	0.012	0.014
		Max Phase Error [mrad]	Uncompensated	12.40	15.52	1.97	2.32	0.42	0.53
			Compensated	4.02	2.70	1.51	1.05	0.31	0.14
			Expanded Uncertainty (99 %)	0.14	0.12	0.14	0.13	0.13	0.15
VT	Burden 0 %	Max Ratio Error [%]	Uncompensated	0.869	1.674	0.514	0.540	0.440	0.452
			Compensated	0.472	0.408	0.447	0.410	0.379	0.350
			Expanded Uncertainty (99 %)	0.012	0.010	0.011	0.011	0.012	0.011
		Max Phase Error [mrad]	Uncompensated	4.04	13.16	1.72	2.74	1.68	2.77
			Compensated	1.28	0.68	1.10	1.56	1.32	1.70
			Expanded Uncertainty (99 %)	0.14	0.13	0.14	0.15	0.14	0.13
	Burden 100 %	Max Ratio Error [%]	Uncompensated	0.418	1.194	0.104	0.195	0.089	0.221
			Compensated	0.075	0.061	0.064	0.070	0.083	0.087
			Expanded Uncertainty (99 %)	0.012	0.010	0.011	0.011	0.012	0.011
		Max Phase Error [mrad]	Uncompensated	2.51	11.53	0.57	2.18	1.18	2.63
			Compensated	0.95	0.42	0.48	0.55	0.59	0.58
			Expanded Uncertainty (99 %)	0.14	0.13	0.14	0.15	0.14	0.13

de fréquence effectué à basse tension jusqu'à la première résonance. Ces deux ensembles de données permettent d'obtenir facilement une réponse en fréquence approximative mais précise à l'aide d'un modèle ajusté non-linéaire. Les résultats sont présentés et validés par comparaison avec une caractérisation de la fréquence de référence effectuée à l'INRIM sous la tension nominale.

2.12.5 Résultats de la méthode

La réponse en fréquence de l'erreur de rapport obtenue par le balayage de fréquence à basse tension et celle obtenue par la méthode proposée sont comparées à la réponse de référence FH1 et leurs écarts sont indiqués à la figure 2.11. La procédure d'ajustement permet de réduire considérablement la différence de l'erreur de rapport par rapport à l'essai de référence. A titre d'exemple, à 400 Hz, l'écart passe de 1,2 % à 0,07 %, à 2 kHz de 1,1 % à 0,02 % et, enfin, à 4 kHz de 0,92 % à 0,17%.

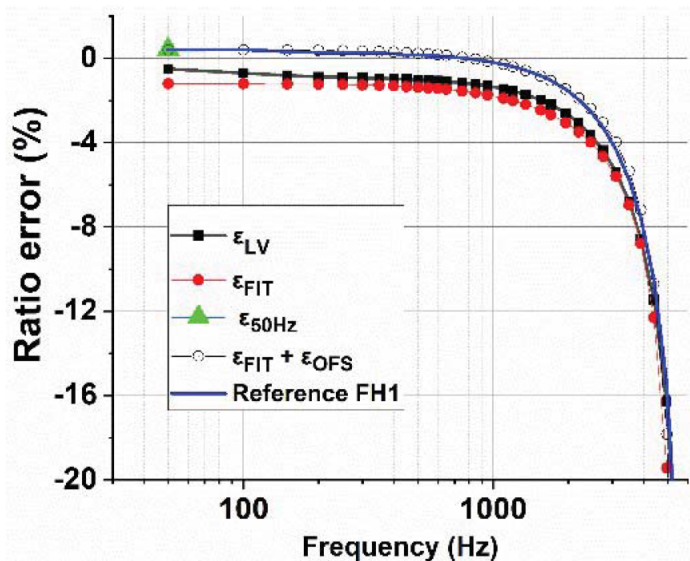


FIGURE 2.11 – Comparaison entre l’erreur de rapport mesurée avec un balayage de fréquence de 7 V, l’erreur ajustée et la réponse approximative proposée.

2.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les transformateurs de mesure. Prime abord, nous avons présenté les deux grandes catégories de ces transformateurs à savoir les transformateurs de tension et ceux de courant, la connexion de leurs enroulements, leurs domaines d’utilisation, les matériaux de leurs noyaux ainsi que les différents types de charges connectées à ces transformateurs. Nous nous sommes penchés, par la suite, sur les transformateurs de tension. Pour cela, nous avons dévoilé les technologies des différents types de ces transformateurs à savoir, inductif, capacitif, résistif et optique.

Comme l’industrie des transformateurs de mesure s’appuie fortement sur les standards, nous avons énuméré les principales normes internationales dédiées aux transformateurs de mesure, en particulier celles CEI 61869 -1 et CEI 61869 -3, et donné leurs domaines d’application. En nous inspirant notamment la norme CEI 61869 -3, nous avons présenté les termes, les définitions ainsi que les abréviations des différents paramètres qui seront utilisés dans les chapitres suivants de ce présent mémoire. Pour clore ce chapitre, nous avons illustré, le principe de base, le circuit électrique équivalent, le diagramme de phase ainsi que les différentes méthodologies de calcul et d’analyse de l’erreur de rapport et de la classe de précision du transformateur inductif de tension, objet de notre étude.

Chapitre 3

Dimensionnement et construction du transformateur Y12P

3.1 Introduction

A travers notre présent mémoire, nous visons principalement à étudier la variation des erreurs de rapport et de phase du transformateur Y12P sur une plage de fréquences allant de 50 Hz à 500 Hz. Cette étude permet, en fait, d'obtenir la caractéristique fréquentielle du transformateur en question, en prenant en compte la classe de précision requise par l'entreprise ainsi que les normes de mesure de la CEI adoptées [4, 5]. Ce qui garantira la qualité et la fiabilité des mesures effectuées. Dans le cadre de notre étude fréquentielle, nous commençons d'abord par dimensionner et construire deux transformateurs de mesure, identiques, de type Y12P, conformément aux normes susmentionnées. Nous effectuerons, par la suite, différents tests de précision à l'entreprise pour nous assurer du bon état de fonctionnement des transformateurs. Enfin, les transformateurs seront transportés au LSEE pour effectuer les tests de fréquences.

3.2 Présentation de l'entreprise SADTEM

Fondée en 1929 et implantée à Douai (France), SADTEM [2] est une entreprise familiale centenaire (depuis 3 générations), privée, donc totalement indépendante. Elle est spécialisée dans la fabrication de transformateurs de mesure et de protection moyenne tension pour usage intérieur et extérieur.

SADTEM s'engage à garantir la qualité de ses produits fabriqués en assurant une conformité rigoureuse aux exigences de la norme ISO 9001 [35]. Ses secteurs d'intérêt concernent notamment l'énergie renouvelable (le photovoltaïque et l'éolienne, en particulier), le trafic ferroviaire, la production d'énergie (centrales électrique, thermique et hydro-électrique), la distribution d'énergie, les laboratoires et métrologies [2].

SADTEM est dotée des laboratoires mécanique et électrique. Celui électrique (Figure 3.1) est équipé d'installations de tests automatiques ultra-modernes. Outre les essais de routines normalisés, d'autres tests de type et de tenue sont assurés à savoir :

- Chocs de foudre jusqu'à 500kV ;
- Essais à fréquence industrielle ;
- Mesure des erreurs à 50, 60 ou 25 Hz ;
- Essais d'échauffement ;
- Vieillesse accélérée sous tension avec exposition aux UV, au brouillard salin et à la pluie ;
- Tenue au froid jusqu'à -50°C .

Par ailleurs, SADTEM possède un atelier de bobinage (Figure 3.2) doté de bobines informatisées, et un savoir-faire dans le bobinage des transformateurs. Ce qui lui permet d'assurer une production de haute qualité et fiable. SADTEM accorde, en outre, une grande importance aux contrôles de qualité à chaque étape du processus de fabrication, conformément aux normes adoptées et aux exigences spécifiques des clients. En outre, des tests préliminaires sont effectués pour assurer



FIGURE 3.1 – Laboratoire électrique de SADTEM

la fiabilité et la performance des produits avant leur commercialisation. Ces pratiques témoignent de l'engagement de SADTEM envers la qualité et la satisfaction des clients.



FIGURE 3.2 – Machines de bobinage

SADTEM possède également d'un atelier de moulage (Figure 3.3). Elle utilise des procédés de moulage contrôlés par ordinateur. Ces procédés, spécifiquement de type sec, sont réalisés avec une grande précision pour garantir des résultats de qualité. L'entreprise dispose de lignes séparées dédiées à chaque procédé et à chaque qualité de résine, permettant ainsi une production optimisée et spécialisée.

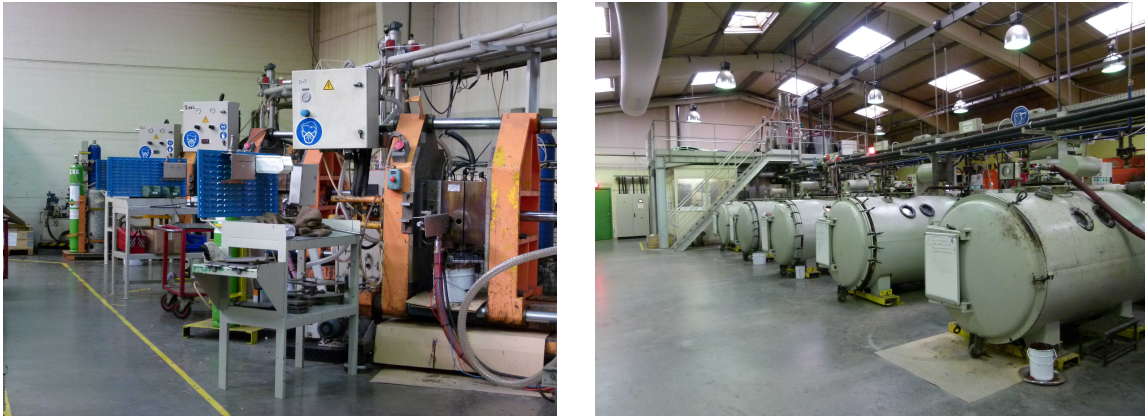


FIGURE 3.3 – Machines de moulage

SADTEM dispose aussi d'un laboratoire de haute technologie (Figure 3.4) qui joue un rôle clé dans ses opérations. Ce laboratoire est utilisé pour effectuer des essais de routine, des essais de type et des activités de recherche et développement (R&D). Il permet d'assurer la conformité des produits, d'explorer de nouvelles technologies et d'améliorer continuellement la qualité des produits fabriqués par SADTEM.

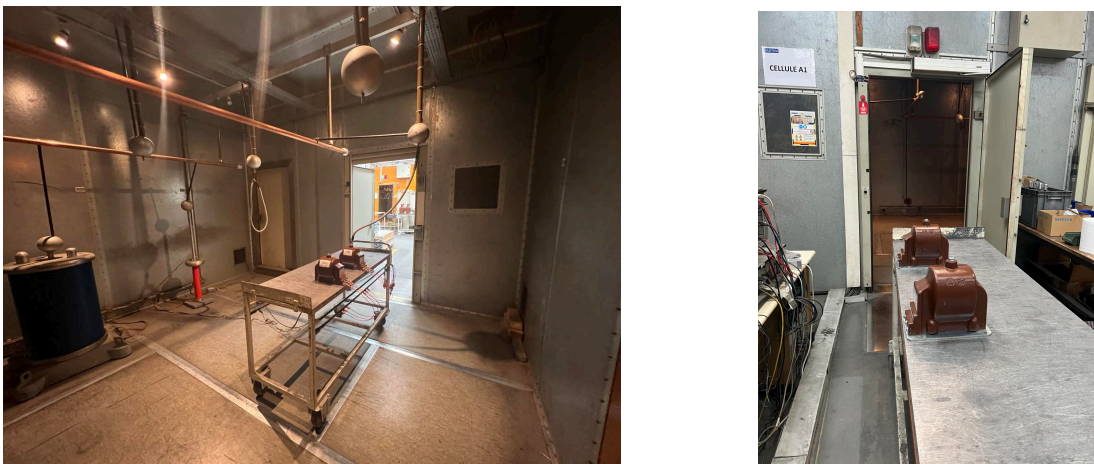


FIGURE 3.4 – Laboratoire tests R&D

Les transformateurs ainsi fabriqués, sont soigneusement entreposés dans des emplacements spécifiques du magasin de SADTEM (Figure 3.5). Ils sont étiquetés de manière claire et précise. Cela garantit une identification facile et rapide lors de la préparation des commandes.



FIGURE 3.5 – Magasin de stockage et préparation de commandes

3.3 Dimensionnement du transformateur

3.3.1 Cahier de charge

Le cahier de charge (Figure 3.1) relatif au transformateur d'étude a été établi par le LSEE. Les caractéristiques de ce transformateur sont présentées dans le tableau suivant.

TABLE 3.1 – Cahier de charge du transformateur

Paramètre	Valeur/Symbole
Famille du transformateur	TT
Modèle du transformateur	Y12P
Fréquence	50/60 Hz
Norme	IEC
Tension nominale primaire V_{AN}	10 000 V
Tension nominale secondaire V_{an}	100 V
Classe de précision (CL)	0,2
Charge assigné	10 VA
Facteur de tension	1,9/08h

3.3.2 Détermination des paramètres de dimensionnement du transformateur

Après avoir constitué le cahier de charge, l'étape suivante consiste en la détermination des paramètres de construction du transformateur. Cette étape a été

réalisée en utilisant un logiciel industriel, interne, conçu par l'entreprise SADTEM et dédié aux ingénieurs de son bureau d'études électrique. Ainsi, en fournissant les caractéristiques du tableau 3.1, le logiciel de l'entreprise est capable de déterminer l'ensemble des paramètres de dimensionnement, de construction et de réalisation du transformateur Y12P. Ces derniers sont résumés dans le tableau 3.2. La fiche générée par le calculateur est dans l'annexe B

TABLE 3.2 – Dimensionnement du transformateur

Paramètre	Valeur
Noyau	
Type de tole	M5X
Langueur radiale	34,0 mm
Largeur	50 mm
C - section	16,3cm ²
Entrefer	0,05 mm
Masse	5,40 kg
Induction à $1,9 * U_n / \sqrt{3}$	1,962 T
Secondaire	
Bobinage	270 trs en 4 couches
Épaisseur	5,7
Largeur	102
Masse	0,588 kg
Primaire	
fil	0,125 mm
masse	0,852 kg
Bobinage	26951 trs en 1 bobine de : 29 couches de 512 trs, crantage = 7 26 couches de 461 trs, crantage = 11 dernière couche partielle = 117 trs repartis
Entre-couche	papier 2 × 4I centième Largeur = 93 Masse = 0,108 kg
Bourrage	Épaisseur = 1 mm Papier HW 10 cent Largeur = 112 mm Masse = 0,020 kg

Il est à noter que la référence M5X de la tôle magnétique est une nomenclature interne à la SADTEM, connue par le calculateur et la longueur radiale et largeur sont

multipliées par le coefficient de froissement (= 0,96) qui tient compte de l'empilement et du vernis des tôles. Si on multiplie la longueur, la largeur et le coefficient de froissement, on retrouve la C-section.

3.3.3 Éléments du schéma équivalent

En plus du dimensionnement, le calculateur de l'entreprise SADTEM estime des paramètres R'_1 , X'_1 et R_2 du schéma équivalent du transformateur de la figure 3.6.

On note qu'à fréquence industrielle, l'induction secondaire n'est pas prise en compte dans ces calculs car elle n'affecte pas la précision.

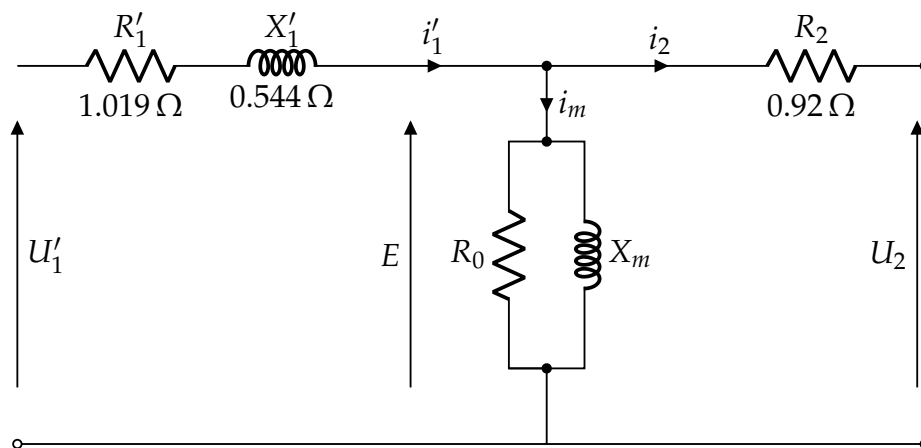


FIGURE 3.6 – Circuit équivalent ramené au secondaire

3.4 Calcul préliminaire des erreurs

3.4.1 Calcul lors du dimensionnement

Après avoir déterminé les paramètres du circuit électrique équivalent, le calculateur estime l'erreur de rapport ϵ_k ainsi que celle de phase $\Delta\phi$. Les valeurs ainsi obtenues sont regroupées dans le tableau 3.3.

Le tableau 3.3 montre que les erreurs ne satisfont pas la classe de précision CL0.2. Nous rappelons que cette classe de précision exige une erreur de rapport ϵ_k comprise entre $\pm 0,2\%$ et une erreur de phase $\Delta\phi$ de ± 10 min. Afin de satisfaire ces conditions, nous allons procéder à une correction dans les limites autorisées par la norme CEI 61869-3 [5].

3.4.2 Correction de l'erreur de rapport

Nous allons apporter une correction au niveau du calculateur en ajustant le rapport de transformation. Cette correction consiste à modifier légèrement l'enroulement primaire d'une valeur de 0,18%. Il est important de souligner que la norme CEI 61869-3 tolère une erreur de 0,2 % sur le rapport de transformation. Par

TABLE 3.3 – Calcul des erreurs avec le logiciel de SADTEM

Charge (VA)	Tension (V)	ϵ_k (%)	$\Delta\phi$ (min)	ϵ_k (%)	$\Delta\phi$ (min)	ϵ_k corrigée (%)
P_n	$0,8 U_n$	-0,10	3	-0,29	6	-0,292
$P_n/4$	$0,8 U_n$	-0,10	3	-0,15	4	-0,151
P_n	U_n	-0,10	3	-0,29	6	-0,289
$P_n/4$	U_n	-0,10	3	-0,15	4	-0,148
P_n	$1,2 U_n$	-0,11	3	-0,15	6	-0,148
$P_n/4$	$1,2 U_n$	-0,11	3	-0,15	4	-0,154

conséquent, le nombre de spires de l'enroulement primaire devient 26951 au lieu de 27000. Ainsi, les erreurs limites sont de 0,029 % à ($P_n/4 \mid 0,8 U_n$) et de -0,115 % à ($P_n \mid 1,2 U_n$).

3.5 Construction du transformateur Y12P

3.5.1 Principaux composants du transformateur

Avant de progresser dans le processus de fabrication, il est nécessaire de mettre en évidence les différents éléments intervenant dans la construction du transformateur. Ainsi, une fiche technique du modèle Y12P ainsi que son dessin technique (DT) sont insérées en annexe **A** et **C**, respectivement.

3.5.1.1 Noyau en fer

Cet élément principal permet de canaliser le flux magnétique. La figure 3.7 montre une colonne du noyau en forme de U. Un DT du noyau est inséré en annexe **D**.



FIGURE 3.7 – Demi-noyau avant l'assemblage.

3.5.1.2 Caniveau

Il s'agit d'une pièce en plastique servant de support de bobinage de l'enroulement secondaire (Figure 3.8). Cette pièce sert également à la séparation entre l'enroulement secondaire et le noyau.

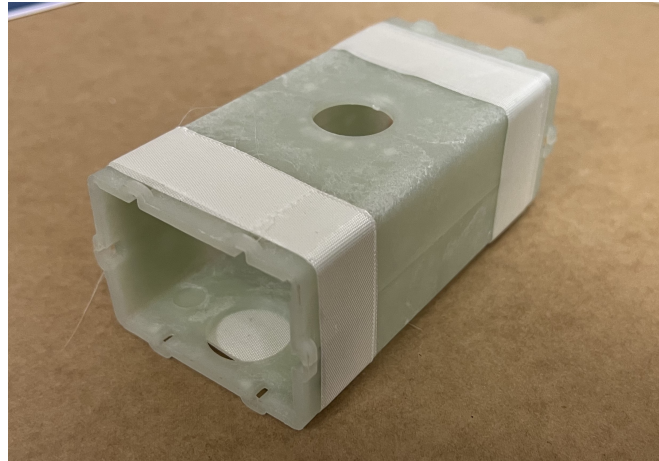


FIGURE 3.8 – Caniveau.

3.5.1.3 Enroulements primaire et secondaire

Ce sont les enroulements électriques qui permettent le transfert d'énergie dans le transformateur.

3.5.2 Bourrage en papier

Il s'agit d'un empilement de couches de papier qui sépare l'enroulement primaire et celui secondaire. Son rôle est d'assurer l'isolation contre les décharges partielles entre les deux enroulements.

3.5.3 Moulage en résine

La résine de moulage remplit deux fonctions principales. Elle isole le transformateur contre les décharges partielles et protège l'appareil contre les contraintes externes. De plus, elle confère au transformateur une forme plus ergonomique et un design agréable.

3.5.4 Support d'appui

Il s'agit d'une pièce métallique reliée à la terre, sur laquelle le transformateur est fixé. Elle offre une meilleure maniabilité lors du transport et du rangement du transformateur. Elle est équipée de trous permettant sa fixation à l'endroit approprié.

3.5.5 Préparation du bon de commande

Cette phase intervient juste après l'étude de dimensionnement du transformateur. Il s'agit d'une procédure interne à l'entreprise qui consiste à rédiger de manière concise toutes les étapes de construction en tenant compte du type du fil utilisé, le nombre de couches de bobinage, le marquage des bornes, etc. En d'autres termes, le bon de commande ressemble à une recette rédigée de manière normalisée et exploitable. Il sera communiqué aux techniciens des ateliers de bobinage. Un échantillon de ce bon de commande est présenté en annexe F.

3.5.6 Bobinage secondaire

La première étape consiste à placer le caniveau sur un support de bobinage (Figure 3.9). Le support est un axe tournant métallique à remettre dans la machine à bobinage. Ensuite, nous collons volontairement sur le caniveau un thermocouple de type K qui nous servira, par la suite, à surveiller la température du transformateur.

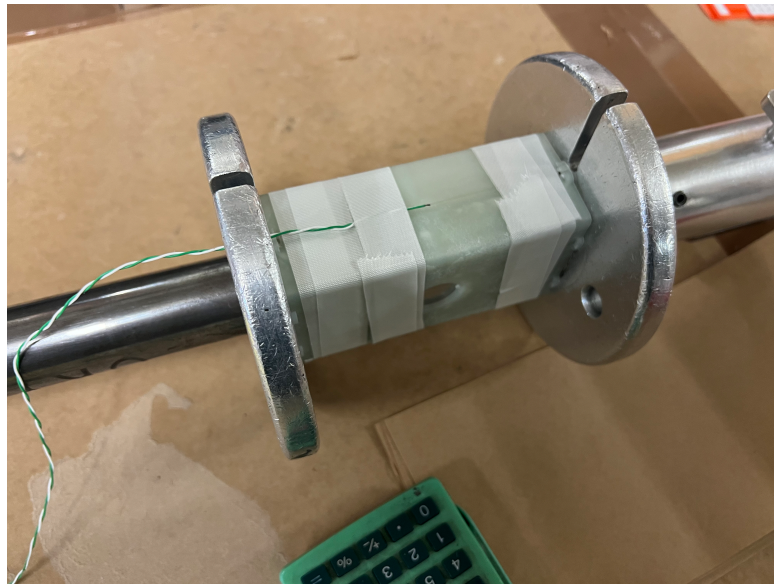
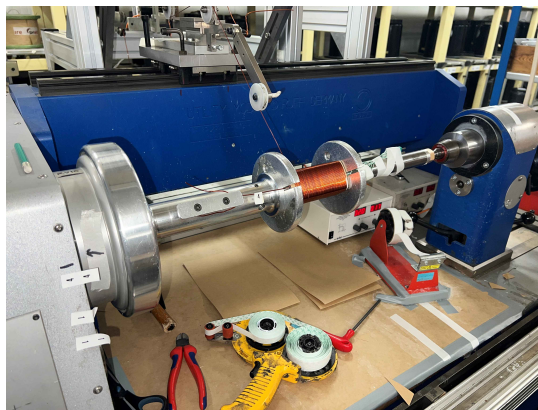


FIGURE 3.9 – Caniveau prêt au bobinage avec un thermocouple

La phase du bobinage avec la machine (bobineuse) est semi-automatisée, car elle nécessite l'intervention d'un opérateur dans la partie isolation. Concrètement, la machine s'en charge de bobiner les couches de spires (Figure 3.10a). Ensuite, l'ouvrier rajout à chaque couche de bobine, une couche d'isolant en papier puis remet la machine en marche (Figure 3.10b).



(a)



(b)

FIGURE 3.10 – Bobinage de l'enroulement secondaire

Une fois l'étape achevée, nous récupérons notre enroulement secondaire comme le montre la figure 3.11

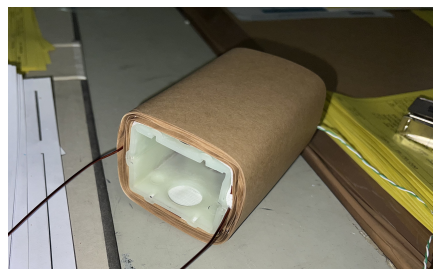


FIGURE 3.11 – Enroulement secondaire

3.5.7 Bobinage primaire

Cette étape est similaire à celle d'avant, sauf que cette fois-ci, l'enroulement primaire va s'appuyer sur le secondaire avec un bourrage papier d'isolation entre les deux. La figure 3.12 montre la partie bobinage finie.

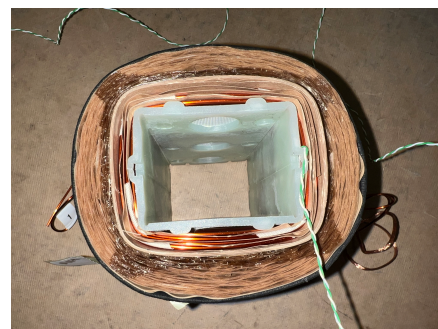


FIGURE 3.12 – Enroulement primaire

3.5.8 Assemblage du noyau

Maintenant, tous les composants du circuit magnétique sont rassemblés, à savoir les deux colonnes en fer et le bobinage (Figure 3.13).



FIGURE 3.13 – Circuit magnétique du transformateur

3.5.9 Gansage

Avant de soumettre le transformateur au moulage, nous recouvrons le circuit magnétique avec du liège (Figure 3.14). Cela protège le noyau de la pression exercée par le moulage à la résine. Dans l'entreprise, on désigne ce procédé par un terme familier : *le gansage*. Aussi, on prépare la plaque à bornes du transformateur.

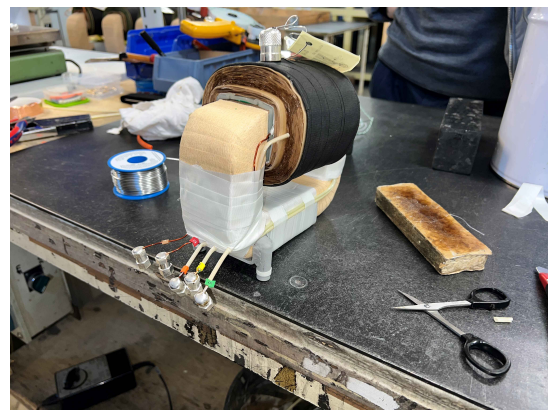


FIGURE 3.14 – Transformateur avec une couche de liège "le gansage"

3.5.10 Test des performances du transformateur avec l'équipement OMICRON VOTANO 100

La coulée du transformateur à la résine est une étape très délicate, car elle est **irréversible**. Ainsi, on n'aura plus accès aux composants internes, notamment les enroulements primaires et secondaires, une fois le transformateur coulé. Par conséquent, en cas de défaut de fabrication, il sera impossible d'intervenir sur le transformateur. Pour remédier à cela, avant de transporter les transformateurs vers l'atelier de coulée, un test de performance globale est effectué sur chaque transformateur à l'aide d'un équipement industriel appelé OMICRON VOTANO 100.

Cet équipement réalise une analyse approfondie du transformateur et détecte les anomalies telles que les court-circuits. De plus, il fournit des informations sur les caractéristiques telles que les éléments du schéma équivalent, la courbe de magnétisation et le calcul des erreurs. Nous pourrions, par la suite, comparer le calcul d'erreur du programme SADTEM avec celle du dispositif industriel VOTANO 100.

3.5.10.1 Présentation du VOTANO 100

Le VOTANO 100 (Figure 3.15) est le premier appareil portable à offrir des tests ultra précis pour les transformateurs de tension et qui peuvent accompagner une précision de l'ordre de 0,2%. Cet appareil permet, non seulement, de réaliser des contrôles de performances électriques, mais également, de vérifier la classe et d'étalonner les transformateurs.

Le VOTANO 100 est capable d'effectuer rapidement des tests sur tous les types de transformateurs de tension inductifs (TT) et capacitifs (TCT) utilisés dans les applications de protection et de mesure. Fabricant ou laboratoire de test, le VOTANO 100 peut être utilisé dans les installations de production ainsi que dans les laboratoires de test et de développement.

Pour les mesures du rapport de transformation, l'appareil est équipé de l'amplificateur de tension VBO2 qui fournit la tension de test nécessaire. De plus, le boîtier de commutation intégré change automatiquement la séquence de test selon les besoins [36].



FIGURE 3.15 – OMICRON VOTANO 100

3.5.10.2 Courbe de magnétisation

Le VOTANO 100 détermine la courbe de magnétisation en faisant varier la fréquence et la tension afin de saturer le transformateur rapidement en basse tension, comme illustré sur la figure 3.16 [37]. Cette procédure est basée sur l'exploitation d'un schéma équivalent du transformateur. En fait, le schéma électrique équivalent du transformateur ramené au secondaire (Figure 2.5) est déjà introduit dans le VOTANO 100, que nous avons utilisé.

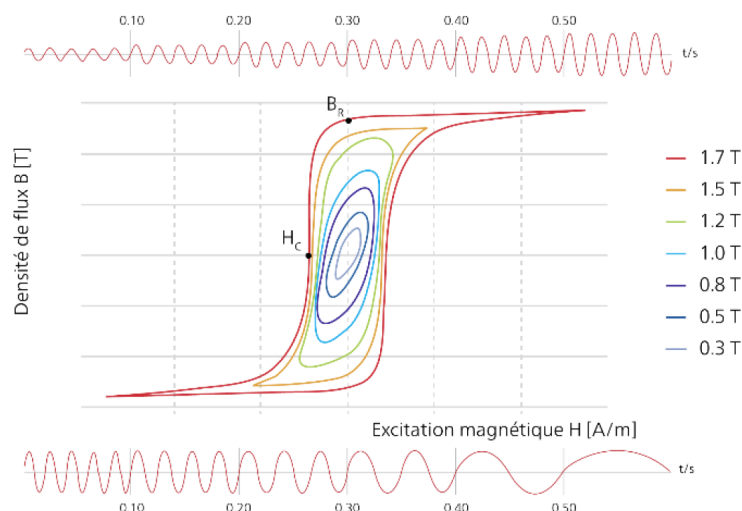


FIGURE 3.16 – Processus de détermination en variant la fréquence à basse tension [37]

L'équipement mesure alors la tension d'alimentation U , la FEM de la branche magnétisante E , le courant d'excitation I_{ext} , et les déphasages (Tableau 3.4). Nous traçons, en suite, la courbe de magnétisation (Figure 3.17).

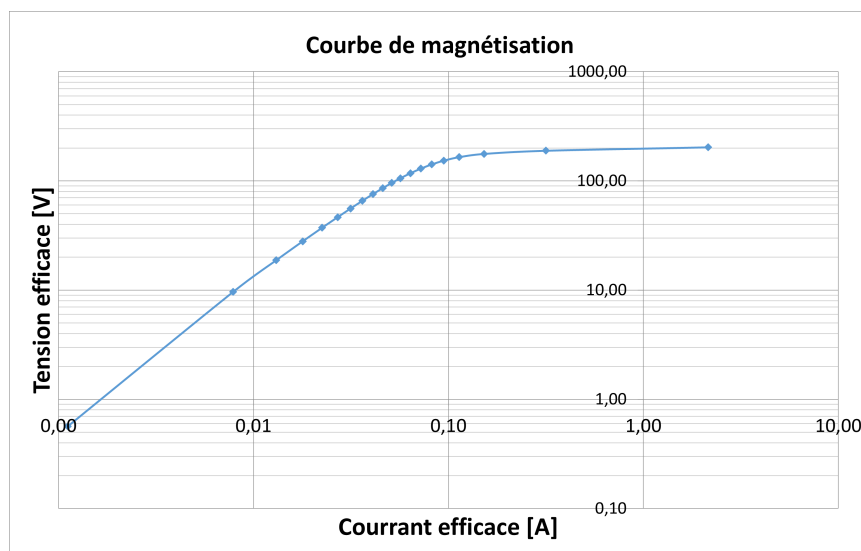


FIGURE 3.17 – Courbe de magnétisation avant coulée

TABLE 3.4 – Tableaux de données de magnétisation du transformateur Y12P avant coulée

Flux [Vs]	U [V]	E [V]	I_{ext} [A]	$\phi(U/I_{ext})$ [deg]	$\phi(E/I_{ext})$ [deg]
0,9138	202,7700	202,9860	2,1480	86,0531	86,4141
0,8502	188,6010	188,8750	0,3158	74,7859	74,8552
0,7951	176,4960	176,6350	0,1522	65,9119	65,9509
0,7429	164,9060	165,0260	0,1137	61,8170	61,8485
0,6900	153,1570	153,2690	0,0947	59,3728	59,4003
0,6364	141,2730	141,3820	0,0820	57,6189	57,6447
0,5829	129,3870	129,4880	0,0721	56,2202	56,2447
0,5292	117,4720	117,5600	0,0639	55,1095	55,1332
0,4756	105,5740	105,6520	0,0566	54,2302	54,2533
0,4308	95,6295	95,6992	0,0511	53,6805	53,7034
0,3861	85,7009	85,7667	0,0460	53,2731	53,2960
0,3411	75,7174	75,7729	0,0410	52,9907	53,0138
0,2963	65,7744	65,8226	0,0362	52,8049	52,8284
0,2514	55,8098	55,8489	0,0315	52,7115	52,7354
0,2094	46,4804	46,5145	0,0270	52,7622	52,7868
0,1676	37,1993	37,2266	0,0225	53,1017	53,1275
0,1259	27,9594	27,9785	0,0179	53,7155	53,7430
0,0845	18,7645	18,7774	0,0131	54,9126	54,9430
0,0434	9,6233	9,6302	0,0079	57,5038	57,5404
0,0025	0,5637	0,5656	0,0011	69,1268	69,2248

3.5.10.3 Calcul des erreurs de rapport et de phase

Le VOTANO 100 nous a permis d'évaluer les erreurs de rapport et de phase du transformateur Y12P avant coulée. Ces erreurs sont regroupées dans le tableau 3.5.

TABLE 3.5 – Tableau des erreurs pour les différentes charges et tensions du transformateur avant coulée

Charge (VA) / $\cos(\phi)$	U (V)	ϵ_k (%)	$\Delta \phi$
10/0,8	80%	-0,0762	3,17
	100%	-0,0753	3,19
	120%	-0,0759	3,27
2,5/0,8	80%	0,0801	1,51
	100%	0,0809	1,53
	120%	0,0804	1,61

3.5.11 Éléments du schéma équivalent

Le VOTANO 100 calcule aussi les éléments du schéma équivalent ramené au secondaire. Les éléments sont représentés directement sur le schéma équivalent de la figure 3.18.

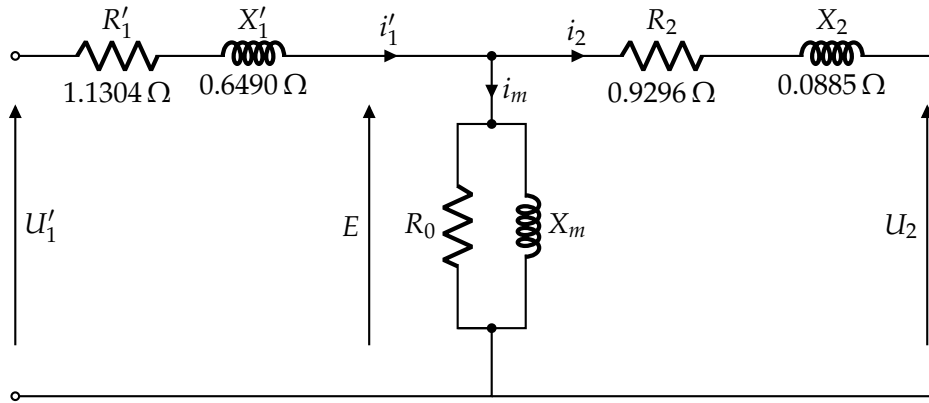


FIGURE 3.18 – Circuit équivalent avant coulée

3.5.12 Moulage

Le transformateur passe par l'étape de coulée à vide (Figure 3.19), qui est la dernière étape du processus de fabrication d'un transformateur SADTEM. Après cette étape, les transformateurs sont recouverts d'une couche de vernis, marqués, envoyés au magasin et sont ainsi prêts pour l'expédition.

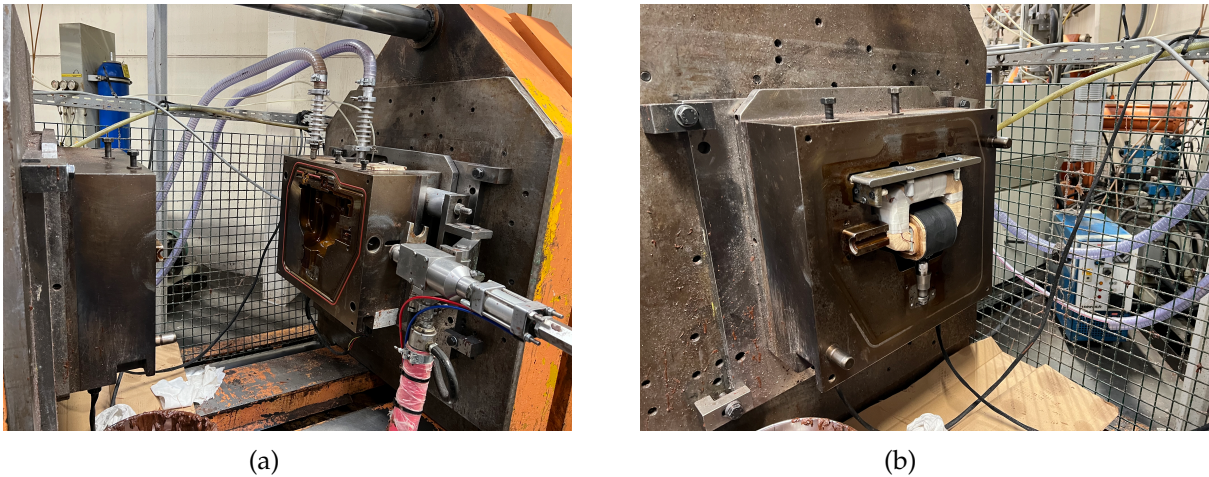


FIGURE 3.19 – Transformateur dans le moule prêt pour la coulée

En fin, la figure 3.20 montre les transformateurs Y12P SADTEM, fabriqués et prêts pour être utilisés.



FIGURE 3.20 – Transformateur Y12P

3.6 Essais après réalisation : tests de référence

Avant le transfert des transformateurs du laboratoire SADTEM vers le LSEE, nous effectuons une dernière série complète de tests sur les deux transformateurs à l'aide du VOTANO 100 (voir section 3.5.10), de manière similaire à ceux effectués pendant la phase de construction. Les résultats de ces tests serviront de référence lors de la réalisation des essais au LSEE. Ainsi, en se basant sur les résultats obtenus à SADTEM, nous pourrions évaluer la validité du dispositif d'essais au LSEE, de point de vue qualité et précision des mesure.

De plus, nous pourrions, à travers ces tests, analyser l'effet du moulage sur les caractéristiques du transformateur.

3.6.1 Courbe de magnétisation

Les données relevé de l'équipement après coulée sont regroupées dans le tableau 3.6 et la courbe de magnétisation est illustrée sur la figure 3.21.

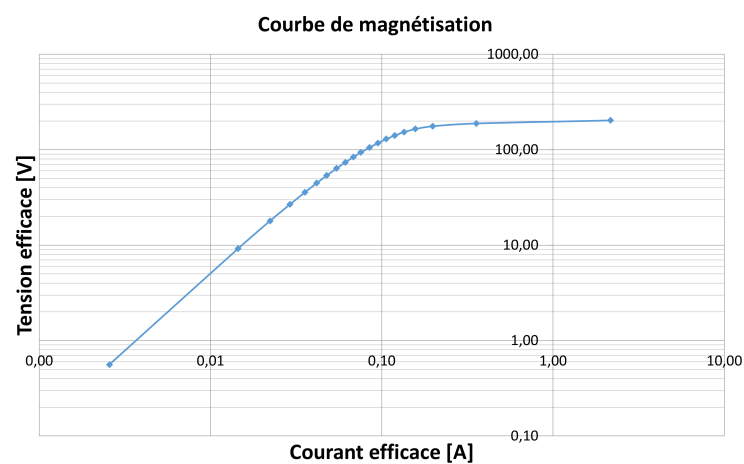


FIGURE 3.21 – Courbe de magnétisation Y12P

TABLE 3.6 – Tableaux de données de magnétisation du transformateur Y12P après coulée

Flux [Vs]	U [V]	E [V]	I_{ext} [A]	$\phi(U/I_{ext})$ [deg]	$\phi(E/I_{ext})$ [deg]
0,9138	202,8390	202,9920	2,1659	85,6801	86,0525
0,8488	188,3250	188,5590	0,3564	74,9223	75,0059
0,7937	176,2060	176,3240	0,1981	68,2656	68,3189
0,7417	164,6650	164,7730	0,1570	65,4392	65,4845
0,6888	152,9120	153,0160	0,1350	63,7989	63,8407
0,6356	141,0930	141,1860	0,1191	62,6019	62,6420
0,5822	129,2390	129,3270	0,1061	61,6359	61,6738
0,5285	117,3280	117,4130	0,0949	60,8241	60,8613
0,4749	105,4270	105,4990	0,0847	60,1228	60,1594
0,4212	93,5128	93,5754	0,0755	59,5315	59,5681
0,3765	83,5923	83,6481	0,0682	59,1126	59,1499
0,3317	73,6426	73,6910	0,0612	58,7660	58,8038
0,2869	63,7038	63,7435	0,0544	58,4698	58,5087
0,2421	53,7586	53,7908	0,0477	58,2268	58,2669
0,2014	44,7148	44,7407	0,0417	58,1111	58,1535
0,1609	35,7248	35,7451	0,0355	58,1180	58,1632
0,1207	26,8005	26,8158	0,0291	58,2165	58,2658
0,0808	17,9460	17,9553	0,0223	58,5465	58,6033
0,0413	9,1794	9,1820	0,0145	59,9887	60,0614
0,0025	0,5593	0,5593	0,0026	75,2001	75,4362

3.6.2 Éléments du schéma équivalent

Les éléments du schéma équivalent sont recalculés systématiquement à chaque test. Ces éléments sont représentés directement sur le schéma équivalent de la figure 3.22.

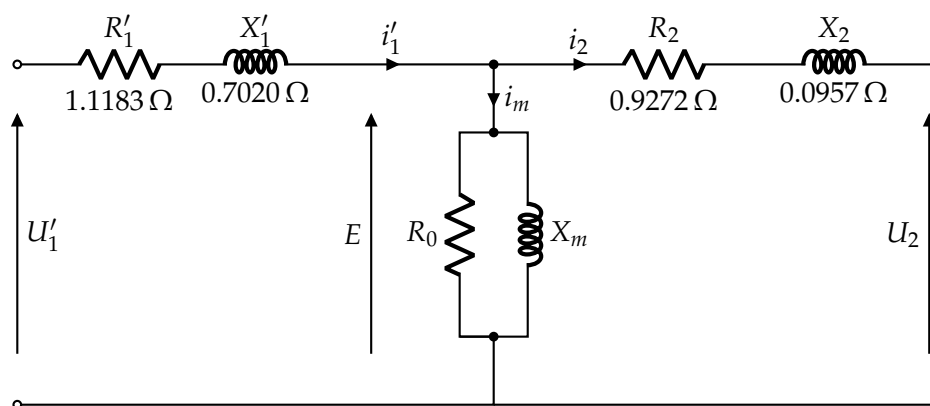


FIGURE 3.22 – Circuit équivalent après coulée

3.6.2.1 Calcul d'erreurs

Le tableau 3.7 présente les erreurs de rapport et de phase après la coulée du transformateur.

TABLE 3.7 – Tableau des erreurs pour les différentes charges et tensions après coulée

Charge (VA) / $\cos(\phi)$	U (V)	ϵ_k (%)	$\Delta \phi$
10/0,8	80%	-0,1079	3,7
	100%	-0,1053	3,72
	120%	-0,1049	3,79
2,5/0,8	80%	0,0501	2,19
	100%	0,0527	2,20
	120%	0,0530	2,28

3.7 Comparaison des résultats avant et après la coulée du transformateur

Il est important d'observer l'effet du moulage résine sur le circuit équivalent du transformateur, car en effectuant un dimensionnement contraint par une précision de l'ordre de 0,2%, il sera nécessaire de prendre en considération tous les paramètres pouvant influencer les éléments du schéma équivalent et la précision.

En premier lieu, contrairement à la modélisation du VOTANO 100 (Figures 3.18 et 3.22), la modélisation de la SADTEM (Figure 3.6) ne prend pas en considération la réactance de fuite secondaire, du fait que celle-ci n'a pas d'impact sur la fiabilité des calculs.

En seconds lieu, nous remarquons qu'il y a un léger changement dans les valeurs du modèle équivalent du VOTANO 100, avant et après la coulée du transformateur (Figure 3.18 et 3.22 respectivement). Les réactances de fuite primaire et secondaire ont légèrement augmenté après la coulée du transformateur. Ces réactances ont passé d'une valeur de $X'_1 = 0,6490\Omega$ et $X_2 = 0,0885\Omega$ à $X'_1 = 0,7020\Omega$ et $X_2 = 0,0957\Omega$. La résistance primaire R'_1 diminue d'une valeur de $1,1304\Omega$ à $1,1183\Omega$, tandis que la résistance secondaire ne change pratiquement pas pour les 3 modèles (calculateur, VOTANO 100 avant et après le moulage). Sa valeur est de $0,92\Omega$.

3.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré au dimensionnement, à la construction et aux tests à la fréquence industrielle 50 Hz du transformateur inductif de tension Y12P, et ce

au niveau de l'entreprise SADTEM. Ces trois procédures ont été effectuées conformément aux normes CEI 61869 -1 et CEI 61869 -3. Une classe de précision très fine, à savoir 0,2, a été adoptée par l'entreprise en vue de fabriquer des transformateurs fiables.

En se basant sur le cahier de charge établi par le LSEE, le dimensionnement a été réalisé par le biais d'un calculateur développé par l'entreprise. Les nombres de spires des enroulements primaire et secondaire ont été trouvés égaux à 26951 et 270 respectivement. La construction a été effectuée en réalisant le bobinage des enroulements primaire et secondaire, l'assemblage des colonnes du noyau magnétique sur les enroulements, l'application d'une couche de liège protectrice sur le noyau magnétique, et le moulage. Des tests de précision ont été réalisés à 50 Hz, avant et après le moulage, à l'aide du VOTANO 100. La classe de précision de 0,2 est validée. Le VOTANO 100 a fourni, en outre, les éléments du schéma équivalent ramenés au secondaire. Ces valeurs sont $R'1 = 1,1183$ ohm, $X'1 = 0,7020$ ohm, $R2 = 0,9272$ ohm et $X2 = 0,0957$ ohm. Finalement, la linéarité de la courbe de magnétisation du transformateur commence à être perdue pour les courants dépassant 0,1 A; pour lesquelles, le noyau commence à se saturer.

Chapitre 4

Caractérisation fréquentielle du transformateur Y12P

4.1 Introduction

Nous avons abordé, dans le chapitre 2, les notions scientifiques et techniques nécessaires à la réalisation d'un transformateur de mesure de tension conformément aux normes CEI 61869 -1 et 3 [4, 5]. Nous avons, également, présenté, dans le chapitre 3, les procédures de dimensionnement et de fabrication deux transformateurs identiques (de type Y12P), ainsi que les tests de fonctionnement et de la classe de précision 0,2 effectués à l'entreprise SADTEM.

Le présent chapitre porte sur les essais effectués au Laboratoire des Systèmes Électrotechniques et Environnementaux (LSEE) quant à la réponse fréquentielle des transformateurs. Cependant, la réalisation du banc d'essais nous permettant d'accomplir cette tâche était si complexe. Le principal défi était de mettre en place un banc d'essais qui (i) répond aux exigences de la classe de précision 0,2, telles que vérifiées lors des tests en entreprise, et (ii) est capable de fournir une tension sur une gamme de fréquence allant de 50 à 500 Hz, de mesurer la tension d'entrée et de sortie du transformateur, et d'évaluer les erreurs de rapport et de phase.

4.2 Équipements utilisés

4.2.1 Source de tension alternative : KEYSIGHT AC6802B

Nous proposons d'utiliser une alimentation électronique KEYSIGHT (Figure 4.1) qui fournit une tension alternative monophasée allant de 0 à 1000 V, avec une fréquence allant de 40 à 500 Hz. Cette source peut délivrer une puissance maximale de 1000 VA. Elle est également capable de fournir un courant de 10 A et 5 A sur une plage de tension de $155 V_{rms}$ à $310 V_{rms}$, respectivement. Ce générateur de basses fréquences (GBF) sera utilisé ultérieurement comme source d'alimentation pour les transformateurs.



FIGURE 4.1 – GBF KEYSIGHT AC6802B

4.2.2 Oscilloscope TEKTRONIX MSO4034

Nous visualisons et enregistrons les différentes grandeurs mesurées à l'aide d'un oscilloscope numérique de type TEKTRONIX MSO4034 (Figure 4.2), que nous

noterons "oscillo A". Cet oscilloscope dispose de 4 voies numériques avec une résolution de 8 bits, une bande passante de 350 MHz et une mémoire de 10 Mpts. De plus, il est équipé d'une entrée USB et d'un port Ethernet.

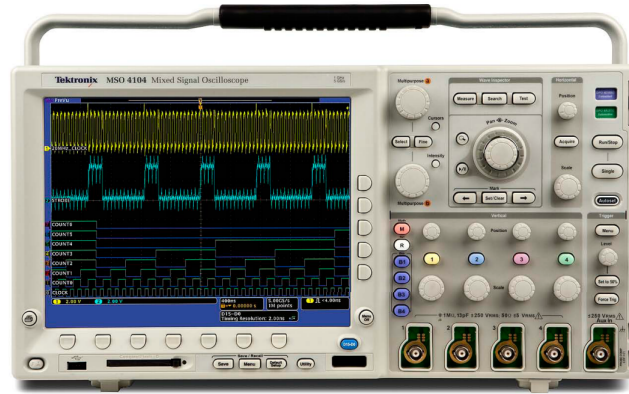


FIGURE 4.2 – Oscilloscope TEKTRONIX MSO4034

4.2.3 Oscilloscope TEKTRONIX MSO58

Nous utilisons également un deuxième oscilloscope TEKTRONIX MSO58 (Figure 4.3), que nous notons "oscillo B", plus performant, permettant ainsi d'améliorer la précision des mesures. Cet oscilloscope dispose de 8 voies numériques avec une résolution de 12 bits (ou 16 bits en mode haute résolution), une bande passante de 500 MHz et une mémoire de 250 Mpts. Chaque voie offre la possibilité de visualiser le signal d'entrée sous forme d'onde, de spectre, ou les deux simultanément. De plus, il est équipé d'une mémoire interne de 128 Go, de 3 entrées USB et d'un port Ethernet.



FIGURE 4.3 – Oscilloscope TEKTRONIX MSO58

4.2.4 Sonde de mesure moyenne tension TEKTRONIX P6015A

La sonde de tension TEKTRONIX P6015A, présentée sur la figure 4.4, que nous notons "sonde HT" est conçue pour les mesures de la moyenne tension. La sonde est capable de mesurer une gamme de tension d'entrée allant jusqu'à 20 kV en continu ou crête alternatif avec une bande passante de DC à 75 MHz. La sonde est dotée d'une tension de tenue diélectrique pouvant atteindre 40 kV en alternatif RMS ou crête, entre les bornes d'entrée et le boîtier. Cela garantit une isolation sûre et fiable lors de la mesure de tensions élevées. La résistance d'entrée de la sonde est de 100 M Ω en parallèle avec une capacité de 2 pF. La sonde est équipée d'un connecteur d'entrée de type BNC, compatible avec de nombreux oscilloscopes et instruments de mesure avec une atténuation de 1000 :1. La compensation en fréquence de la sonde est réglable, offrant une précision optimale pour différentes fréquences de mesure.



FIGURE 4.4 – Sonde TEKTRONIX P6015A

4.2.5 Sonde de mesure basse tension TEKTRONIX P5205

La sonde basse tension TEKTRONIX P5205 (Figure 4.5), que nous notons "sonde BT", est spécialement conçue pour les mesures précises de tensions faibles dans diverses applications. Avec une gamme de tension d'entrée de 1000 V, sa bande passante de DC à 100 MHz permet de mesurer des signaux à des fréquences relativement élevées, tout en conservant une bonne résolution. La sonde possède une résistance d'entrée de 50 M Ω en parallèle avec une capacité de 1,5 pF. Son facteur d'atténuation de 50 :1 ou 500 :1 permet d'adapter la tension de sortie à l'oscilloscope connecté. La compensation en fréquence est automatique, assurant une précision optimale sur une large plage de fréquences.



FIGURE 4.5 – Sonde TEKTRONIX P5205

4.2.6 Thermomètre FLUKE 52 II

Le Fluke 52 II présenté sur la figure 4.6 est un thermomètre numérique polyvalent fabriqué. Il est doté de deux entrées indépendantes avec une plage de mesure allant de -200°C à 1372°C (-328°F à 2501°F) et une précision de base de $\pm 0,05\%$. Sa résolution est de $0,1^{\circ}\text{C}$ ($0,1^{\circ}\text{F}$). Le thermomètre propose plusieurs modes de mesure, tels que les modes T1, T2, T1-T2 (différentiel).

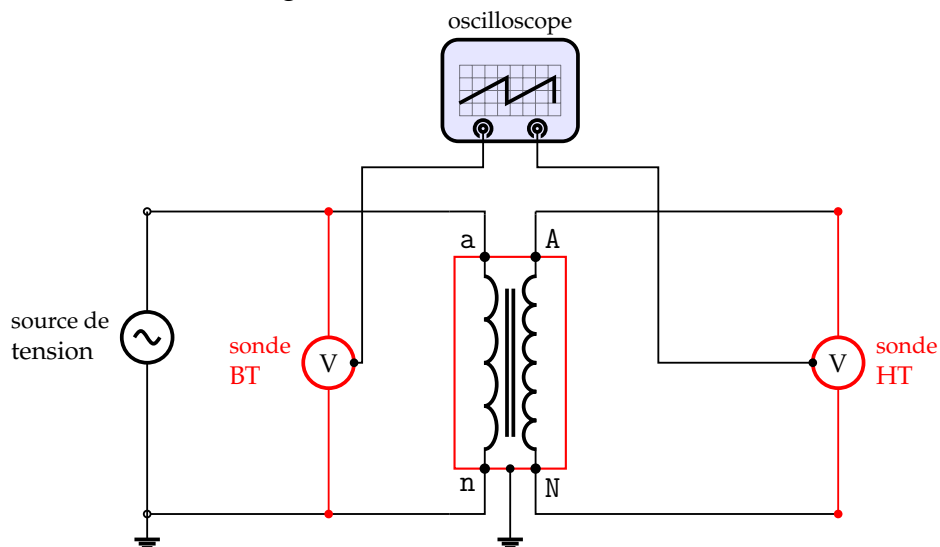


FIGURE 4.6 – Thermomètre Fluke II

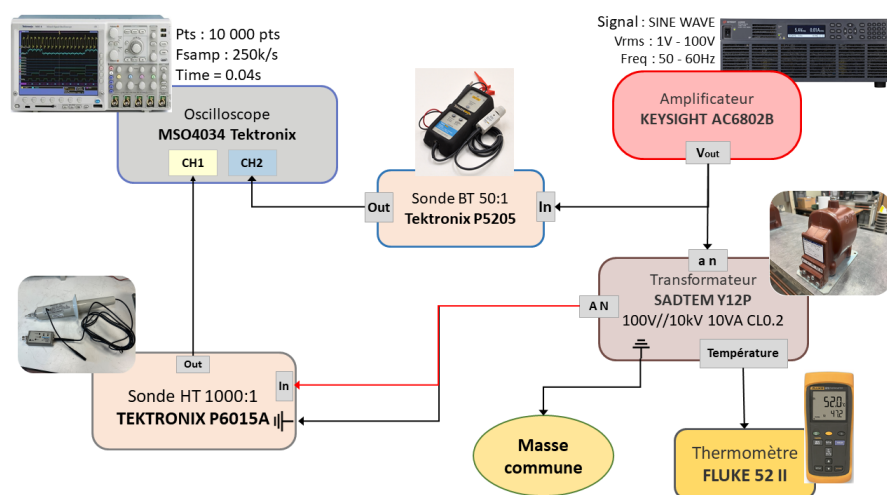
4.3 Réalisation du banc d'essais

En vue de déterminer le rapport de transformation de chacun des deux transformateurs Y12P à vide, à 50 et 60 Hz, nous avons alimenté chaque transformateur du côté secondaire (basse tension), noté V_{an}^1 , avec la source de tension alternative, connectée en parallèle avec la sonde BT. Nous avons connecté le primaire de chaque transformateur (haute tension), noté V_{AN} , à la sonde HT. Nous avons

raccordé la sortie du thermocouple type K au thermomètre FLUKE. Le schéma du branchement est illustré sur la figure 4.7.



(a) Électrique



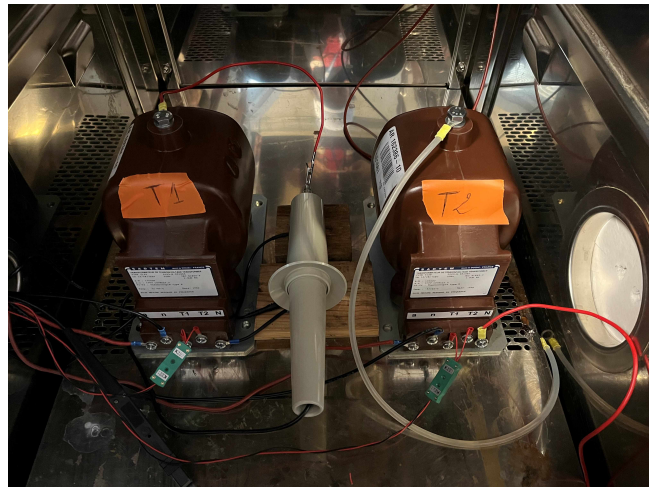
(b) En bloc

FIGURE 4.7 – Schéma du banc d'essais

La figure 4.8 présente la manipulation de test. Les transformateurs ont été placés dans une enceinte climatique qui empêche l'accès directe aux transformateur pendant la mise sous tension (Figure 4.8b).



(a) Équipements d'essais



(b) Transformateurs sous test

FIGURE 4.8 – Banc d'essais au LSEE

4.4 Protocole d'essais

Afin de garantir la sécurité de l'utilisateur lors des manipulations et la fiabilité des mesures, nous avons développé et appliqué un protocole expérimental, avant chaque test. La chronologie de ce protocole est la suivante :

4.4.1 Vérification des branchements

Nous commençons par vérifier les branchements suivants :

- Borne HT - sonde HT ;
- Borne BT - alimentation ;
- Sonde BT - alimentation ;
- Transformateur - prise de terre ;
- Thermomètre - transformateur.

4.4.2 Fermeture et verrouillage de l'enceinte climatique

Nous fermons soigneusement l'enceinte climatique afin de bloquer l'accès aux transformateurs pendant la manipulation.

4.4.3 Allumage des équipements et configuration

Les opérations à effectuer sont les suivantes :

- Configuration de l'atténuation des sondes sur l'oscilloscope : 1000 :1 en HT et 50 :1 en BT ;
- Configuration de la sécurité de l'alimentation : courant maximale 0,5 tension maximale entre 0 et 120 V ; fréquence minimale 50 Hz ;
- Allumage du thermomètre.

4.4.4 Mise sous tension d'un transformateur

Pour cela, il faut :

- Configurer le GBF sur 50 Hz à 1 V ;
- Activer la sortie CH1 du GBF et s'assurer de la bonne lecture sur l'oscilloscope ;
- Monter jusqu'à 50 V (côté primaire, soit 5000 V côté secondaire) à 70 Hz avec un pas de 10 V et s'assurer que toute la manipulation marche bien ;
- effectuer une démagnétisation du transformateur entre 0 V et 120 V.

4.4.5 Début des tests

Une fois le protocole expérimental appliqué, nous procédons aux tests. Il est nécessaire de démagnétiser le transformateur après chaque test.

4.5 Test de précision à 50 Hz : essai 1

4.5.1 Procédé du test

Dans cette section, nous nous concentrons sur deux paramètres essentiels : le rapport de transformation k et l'erreur de rapport ϵ_k , qui sont tous deux liés aux valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire du transformateur. Pour ce faire, nous varions la tension d'alimentation dans une plage de 10 V à 105 V, et nous mesurons, à chaque fois, les tensions efficaces du primaire et du secondaire du transformateur. Les relevés des mesures se font par une lecture directe sur l'oscilloscope.

4.5.2 Résultats du test

Le tableau 4.1 présente les résultats du test consistant en : la tension de sortie de l'alimentation V_{rms} , la tension efficace V_{an}^1 mesurée à la borne BT du transformateur, la tension efficace V_{AN} mesurée à la borne HT du transformateur, le rapport de transformation k , et l'erreur de rapport ϵ_k calculée avec la formule 2.2. Cette erreur a été tracée en fonction de la tension d'alimentation, comme le montre la figure 4.9. L'analyse de ces résultats nous aidera à évaluer la précision et la fiabilité du transformateur Y12P, faisant l'objet de notre étude.

4.5.3 Discussion des résultats

En observant les résultats, nous constatons que l'erreur de rapport est nettement en dehors de la classe de précision de 0,2% sur l'ensemble de la plage de tension. De plus, la tension à la sortie de l'alimentation chute considérablement une fois arrivée aux bornes primaires du transformateur. Par exemple, en fournissant une tension de 100 V, nous avons mesuré une tension de 94,92 V à la borne BT, ce qui correspond à une chute de tension de 5,08 V. Par ailleurs, nous obtenons, du côté secondaire (HT), une tension de 9672 V, ce qui entraîne une dérive de 1,42 par

TABLE 4.1 – Résultats du test de précision à 50 Hz (essai 1)

V_{rms}	V_{an}^1	V_{AN}	k	ϵ_k (%)
10	9,524	962,6	101,07	-1,0596
15	14,32	1445	100,90	-0,8996
20	19,05	1923	100,94	-0,9360
25	23,84	2405	100,88	-0,8731
30	28,64	2888	100,83	-0,8310
35	33,46	3372	100,77	-0,7710
40	38,14	3847	100,86	-0,8578
45	42,94	4329	100,81	-0,8085
50	47,7	4810	100,83	-0,8316
60	54,24	5777	106,50	-6,1104
70	66,91	6746	100,82	-0,8152
80	84,47	7707	91,23	9,6016
90	85,47	8682	101,57	-1,5549
100	94,92	9627	101,42	-1,4023
105	99,61	10110	101,49	-1,4737

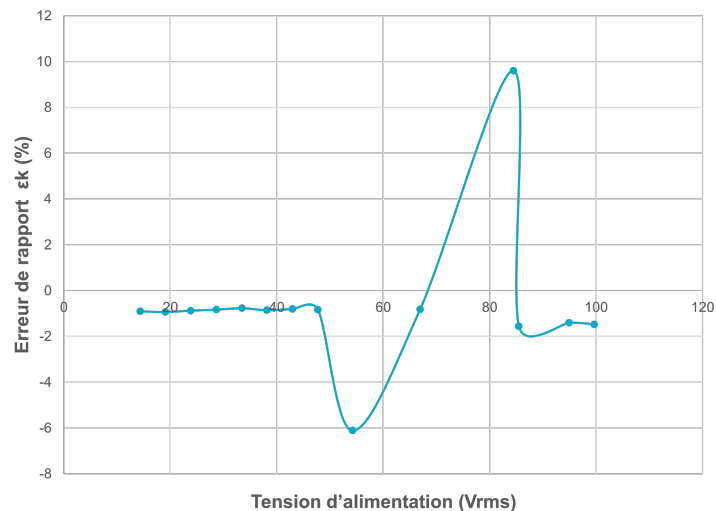


FIGURE 4.9 – Courbe de l'erreur de rapport en fonction de la tension d'alimentation (essai 1)

rapport au rapport de transformation nominal. Nous constatons, en outre, que le thermomètre intégré au transformateur, pour surveiller l'évolution de la température, n'était pas fiable, du fait qu'il affichait des valeurs non significatives, comme 2500 °C, à une tension d'alimentation de 120 V.

Ces résultats indiquent des écarts significatifs par rapport aux spécifications attendues et soulignent la nécessité d'une analyse plus approfondie pour identifier les causes de ces écarts en vue de les corriger. Ainsi, des mesures supplémentaires et des tests complémentaires sont nécessaires pour déterminer les sources exactes des erreurs de rapport et des chutes de tension observées.

4.5.4 Analyse des anomalies

Après une investigation longue et approfondie, nous avons identifié les principales causes de l'écart constaté :

- La sonde BT utilisée entraîne une chute de tension considérable du côté primaire du transformateur. Cette chute de tension affecte les mesures et contribue à l'écart observé dans les résultats ;
- La résolution de l'oscilloscope utilisé, qui est de 8 bits, est insuffisante pour garantir la précision requise de 0,2%. Une résolution plus élevée serait nécessaire pour obtenir des mesures plus précises et réduire ainsi les erreurs ;
- La sonde de tension utilisée nécessite un étalonnage. Un étalonnage précis de la sonde est crucial pour assurer des mesures fiables et précises.

- Le thermocouple de type K est fortement influencé par les effets CEM, en particulier par le champ magnétique à l'intérieur du transformateur. Cette influence était considérable, du fait que le thermocouple a été positionné sous le bobinage secondaire, sur le caniveau très proche du noyau de fer.

4.6 Test de précision à 50 Hz : essai 2

4.6.1 Amélioration du banc d'essais

Après avoir identifié les sources d'erreur, nous avons apporté plusieurs modifications à notre banc d'essais pour améliorer la précision des mesures. Pour cela, nous avons, d'abord, introduit un deuxième oscilloscope doté d'une résolution de 12 bits. Nous avons, par la suite, remplacé la sonde BT, précédemment utilisée, par une sonde électronique. Cette nouvelle sonde offre des performances supérieures et réduit les chutes (pertes) de tension observées précédemment du côté primaire du transformateur. Enfin, nous avons étalonné la sonde HT employée sur le transformateur en utilisant une tension de référence de 600 V, vérifiée à l'aide d'un multimètre. La sonde HT a permis, en fait, de fournir des mesures précises et calibrées, contribuant ainsi à la réduction des erreurs de mesure et à l'amélioration de la fiabilité des résultats obtenus. Cette méthode consiste à mettre hors tension le transformateur au moment où nous souhaitons mesurer la température. Cela permet d'éliminer l'influence des effets CEM et du champ magnétique sur le thermocouple, garantissant ainsi des mesures plus précises de la température. La figure 4.10 illustre le nouveau banc d'essais.

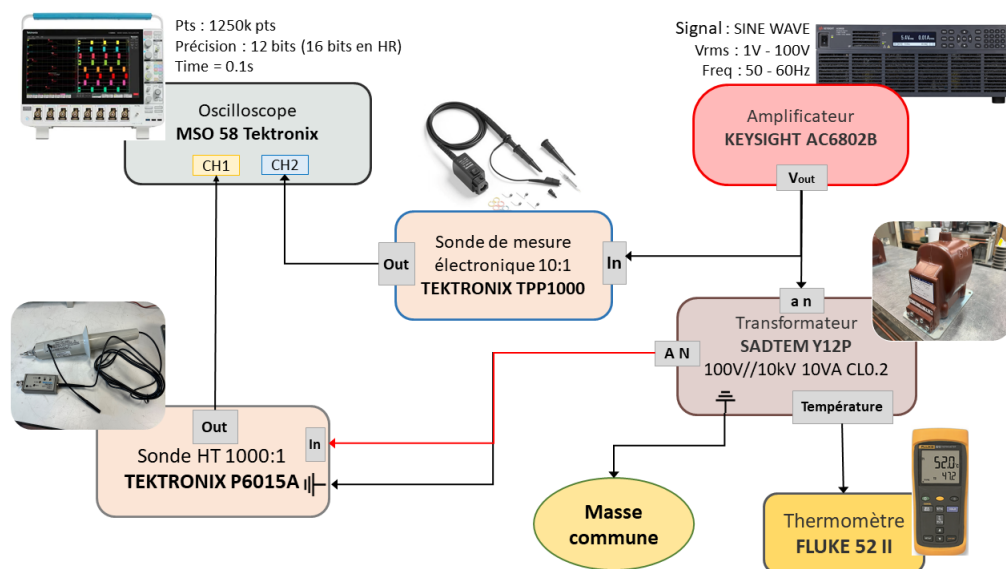


FIGURE 4.10 – Banc d'essais amélioré (deuxième réalisation)

4.6.2 Principe de mesure

Lors de cette mesure, nous avons suivi le même procédé de test précédemment décrit dans la section 4.5.1. De plus, avec le nouveau banc d'essais, nous avons pu atteindre une tension d'alimentation de 120 V. Ainsi, nous avons effectué des tests sur l'ensemble de la plage de tension requise par la norme CEI 61869-3. Cela nous a permis d'avoir une évaluation de l'erreur de rapport du transformateur dans des conditions de fonctionnement variées et de garantir sa conformité aux spécifications relatives à l'erreur de rapport requise par la norme CEI 61869-3.

4.6.3 Résultats du test

Les résultats du deuxième test de précision à 50 Hz utilisant le nouveau banc d'essais sont regroupés dans le tableau 4.2. Par ailleurs, l'erreur de rapport en fonction de la tension d'alimentation est illustrée sur la figure 4.11.

TABLE 4.2 – Résultats du test de précision à 50 Hz (essai 2)

V_{rms}	V_{an}^1	V_{AN}	k	$\epsilon_k(\%)$
10	9,957	995	99,92	0,0703
20	19,9	1989	99,94	0,0502
30	29,9	2989	99,96	0,0334
40	39,22	3982	101,52	0,0526
50	49,89	4985	99,91	0,0802
60	59,87	5981	99,89	0,1003
70	69,94	6986	99,88	0,1145
80	79,63	7963	100	0
90	89,62	8954	99,91	0,0893
100	99,66	9960	99,93	0,0602
110	109,6	10950	99,90	0,0913
120	119,6	11960	100	0

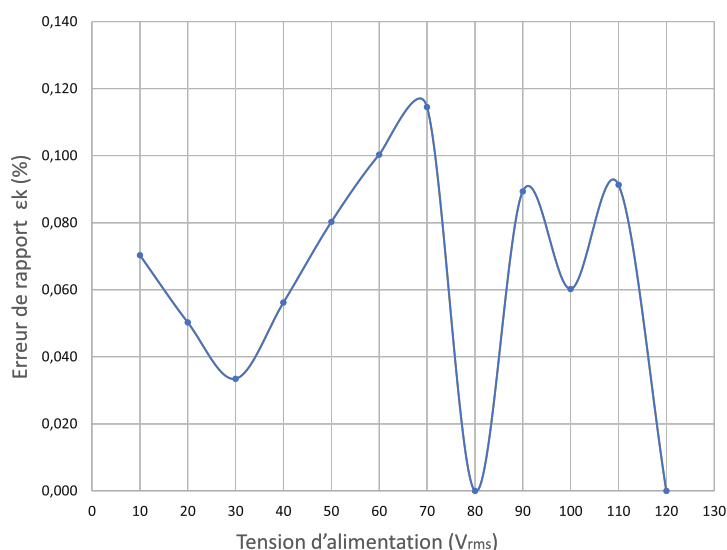


FIGURE 4.11 – Courbe de l'erreur de rapport en fonction de la tension d'alimentation (essai 2)

4.6.4 Discussion des résultats

Nous avons constaté une amélioration significative de la précision des mesures. L'erreur est désormais inférieure à 0,2% pour toutes les tensions d'alimentation, y compris celles (80, 100 et 120 V) spécifiées par la norme CEI 61869-3 ; l'erreur maximale enregistrée est de 0,1145%.

Par ailleurs, nous avons remarqué que la tension primaire V_{an}^1 aux bornes du transformateur est presque égale à celle fournie par la source AC. Cela confirme que la chute de tension observée précédemment était due à la sonde BT utilisée.

Les modifications apportées à notre banc d'essais, notamment l'utilisation d'un oscilloscope à résolution de 12 bits et le remplacement de la sonde BT par une sonde

électronique, ont donc été efficaces pour réduire considérablement cette chute de tension et améliorer ainsi la précision des mesures.

Il est à noter que l'erreur de rapport a été calculée conformément à l'expression 2.2 en utilisant les relevés de l'oscilloscope. Ce calcul manuel prend énormément de temps. Comme méthode complémentaire et rapide, nous nous proposons de recalculer cette erreur en développant un programme sous environnement Matlab, du fait que nous avons enregistré les signaux des tensions primaire et secondaire du transformateur. Ce programme permet une estimation numérique de l'erreur en question.

4.6.5 Estimation numérique de l'erreur de rapport

Comme présenté précédemment, nous avons enregistré, à l'aide de l'oscilloscope, les signaux des tension primaire et secondaire, et ce pour chaque mesure. Cet enregistrement nous a permis d'estimer les valeurs efficaces V_{an}^1 V_{AN} des ces tensions au primaire et au secondaire respectivement. Par ailleurs, nous avons établi un programme Matlab permettant de traiter les données et de recalculer les valeurs efficaces de ces deux tensions. Cette étape complémentaire a pour but d'économiser le temps de calcul de l'erreur de rapport. Elle peut être utilisée comme étant un outil numérique en vue de faciliter et d'automatiser le traitement de données expérimentales ainsi enregistrées.

4.6.6 Résultats obtenus par calcul numérique

Le tableau 4.3 présente la valeur efficace de la tension d'alimentation V_{source} , la tension V_{an}^1 mesurée au bornes primaire, celle V_{AN} prise au bornes secondaire, le rapport de transformation k et l'erreur de rapport ϵ_k . Par ailleurs, la figure 4.12 illustre la caractéristique relative à l'erreur de rapport en fonction de la tension d'alimentation obtenue lors de l'utilisation du nouveau banc d'essais.

4.6.7 Discussion des résultats numériques

Nous constatons que les valeurs numériques obtenues diffèrent de celles mesurées et affichées directement sur l'oscilloscope. Nous observons que toutes les valeurs présentent une erreur dans une plage de 0 à 0,5%. Bien que cette précision soit relativement bonne et utilisable dans d'autres applications dont l'erreur de rapport tolérable est inférieure à 0,5%, elle ne convient pas à notre cas spécifique nécessitant une erreur inférieure à 0,2%.

4.6.8 Analyse des anomalies

Après investigation des résultats, nous sommes arrivés aux constatations suivantes :

TABLE 4.3 – Résultats du traitement de données avec MATLAB (essai 2)

V_{source}	V_{an}^1	V_{AN}	k	$\epsilon_k(\%)$
10	10,004	1000,2	99,98	0,02
20	20,083	2000,9	99,63	0,37
30	30,166	3006	99,64	0,353
40	40,226	4006,3	99,59	0,407
50	50,301	5008,8	99,57	0,425
60	60,417	6016,9	99,58	0,412
70	70,508	7021,5	99,58	0,417
80	80,444	8009	99,55	0,442
90	90,425	9006,8	99,60	0,396
100	100,58	10019	99,61	0,389
110	110,58	11014	99,60	0,399
120	120,66	12066	100	0

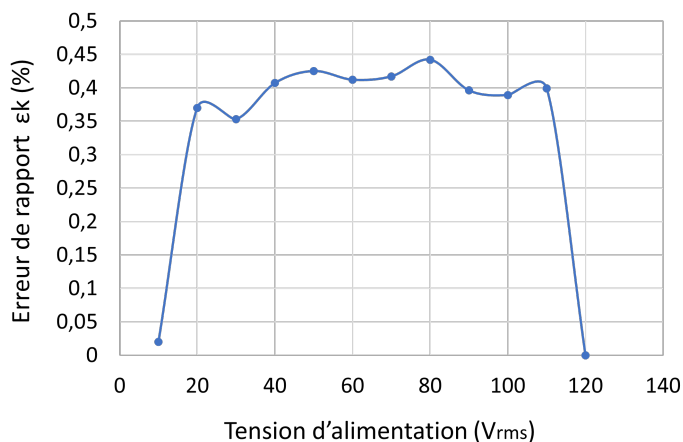


FIGURE 4.12 – Courbe de l'erreur de rapport en fonction de la tension d'alimentation

- La prise de mesure par lecture directe sur l'oscilloscope n'est pas fiable, car elle peut entraîner une erreur considérable. Il s'agit, en fait, d'une mesure instantanée qui peut varier avec le temps. Il est donc nécessaire de prendre en compte cette incertitude lors de l'interprétation des résultats ;
- L'utilisation du transformateur en tant qu'élevateur (alimentation côté secondaire "an" et mesure côté primaire "AN") ne permet pas de comparer les erreurs mesurées ou calculées avec les mesures de SADTEM. En effet, le courant magnétisant qui génère les chutes de tension et provoque les erreurs traverse la résistance et la réactance de fuite du côté secondaire, et non celles du côté primaire. Il est important de tenir compte de cette différence lors de l'analyse des résultats ;
- L'absence d'informations sur l'erreur de phase tout au long de la campagne de mesure peut compliquer l'interprétation des résultats. Il est essentiel de prendre en compte l'erreur de phase, car elle peut avoir un impact significatif sur les performances globales du transformateur. Il est recommandé d'inclure la mesure de l'erreur de phase dans les prochaines étapes de la campagne de mesure afin d'obtenir une évaluation plus complète de la performance du transformateur.

4.7 Test de précision à 50 et 60 Hz : essai 3

4.7.1 Banc d'essais

Ce test de précision a été effectué sur deux transformateurs, de type Y12P, notés T_1 et T_2 respectivement. Ces deux transformateurs sont identiques, donc de mêmes caractéristiques. Le transformateur T_1 est connecté à l'alimentation et remplit la fonction d'élevation de tension, ce qui nous a fourni une source de moyenne

tension. Le transformateur T_2 est soumis à des tests et est alimenté par le côté primaire (haute tension) du premier transformateur (Figure 4.13). Nous avons mesuré alors la tension primaire et celle secondaire aux bornes de ce transformateur. De plus, nous avons ajouté une sonde de courant pour mesurer le courant primaire alimentant le transformateur soumis à des tests.

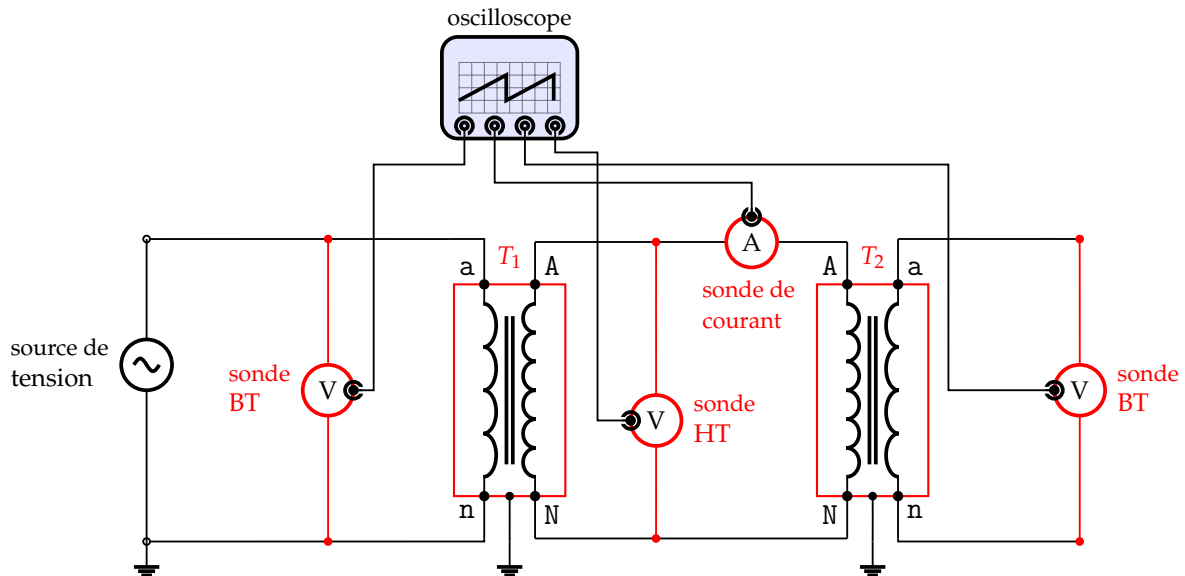


FIGURE 4.13 – Schéma électrique de l'essai 3

4.7.2 Procédé de mesure

Pour garantir une précision maximale, nous avons configuré l'oscilloscope en mode d'acquisition haute-résolution de 16 bits. Ensuite, nous avons enregistré un signal de 1,25 million de points pendant une durée de 1 seconde, ce qui nous a permis d'inclure au moins 50 cycles de signaux à 50 Hz. Par la suite, nous avons effectué une analyse spectrale sur données enregistrées à l'aide de MATLAB en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). Cela nous a permis de déterminer directement l'amplitude de la tension et du courant du fondamental (donc, à 50 Hz). Ceci nous a permis également d'obtenir les valeurs efficaces de la tension primaire et de celle secondaire, du courant primaire, ainsi que les informations sur le déphasage entre la tension et le courant primaires. En utilisant ces résultats, nous avons calculé numériquement l'erreur de rapport et celle de phase.

4.7.3 Résultats obtenus

Afin d'avoir une traçabilité de nos mesures, nous générons, à chaque point de mesure, une fiche de données complète à l'aide d'un code sous environnement MATLAB. La figure 4.14 illustre cette fiche générée pour le point de fonctionnement nominal 10 kV/50 Hz. Le tableau 4.4 recueille les résultats obtenus pour une campagne de mesure à 50 et 60 Hz, et pour 3 niveaux de tension à savoir 80, 100 et 120 V.

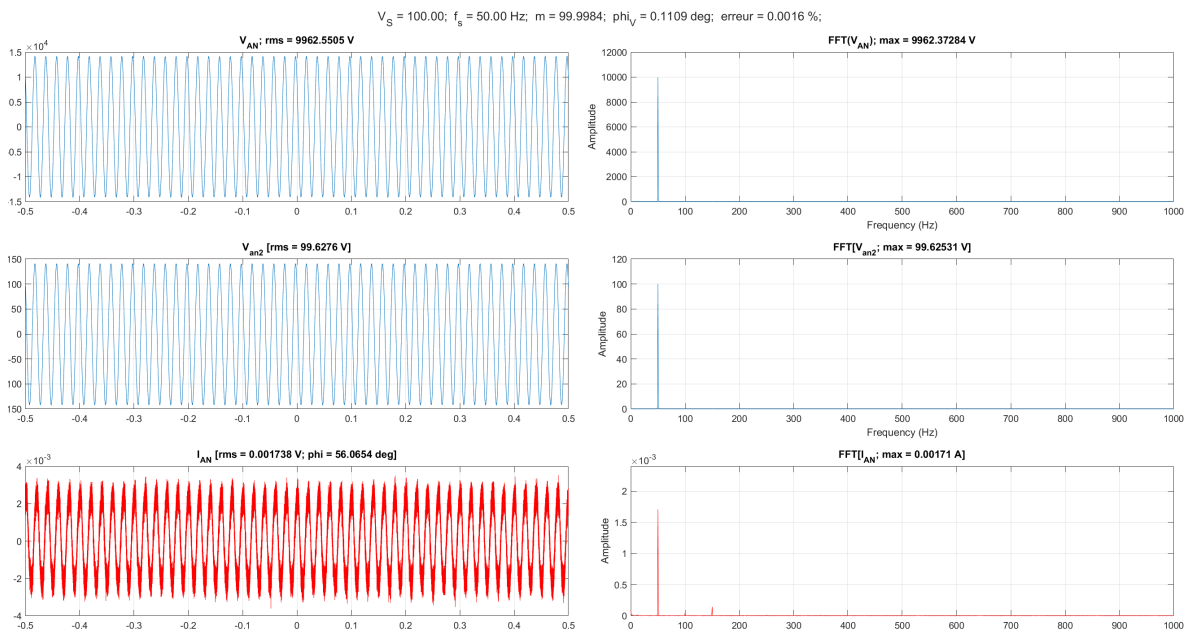


FIGURE 4.14 – Fiche de données générale du test de précision à 10 kV/50 Hz

TABLE 4.4 – Résultats du test de précision à l’aide de la FFT à 50 Hz et 60 Hz

F(Hz)	V_{source}	$V_{AN} [V_{rms}]$	$I_{AN} [A_{rms}]$	$\phi_{V/I} [^\circ]$	$V_{an}^2 [V_{rms}]$	k	$\epsilon_k [\%]$	$\Delta\phi [^\circ]$
50	80	7962,77	0,00138	54,42	79,6529	99,971	0,0288	0,1145
	100	9962,37	0,00171	56,06	99,6253	99,998	0,0016	0,1109
	120	11967,26	0,00207	57,67	119,6786	99,995	0,0050	0,1087
60	80	7972,68	0,00117	55,75	79,7533	99,966	0,0333	0,1507
	100	9963,30	0,00142	56,18	99,6286	100,043	-0,0043	0,1471
	120	11970,65	0,00169	57,02	119,7429	99,972	0,0028	0,1485

4.7.4 Discussion des résultats

En observant attentivement le tableau 4.4, nous pouvons constater une amélioration significative de la précision de nos mesures. En associant l’équipement de mesure à des méthodes de calcul numérique, nous avons réussi à réduire l’erreur de rapport à moins de 0,1% pour tous les points de mesure. De plus, l’erreur de phase est inférieure à 10 minutes, ce qui correspond à 0,166°. Ces résultats confirment que notre méthode expérimentale est fiable, capable de réaliser des mesures de précision et d’évaluer la classe de précision d’un transformateur avec une grande précision, atteignant une classe aussi fine que 0,2%.

L’utilisation de la transformation de Fourier rapide (FFT) nous a permis d’extraire les composantes fondamentales des signaux de tension et de courant, ce qui nous a conduit à des mesures plus précises de l’amplitude, du déphasage et des erreurs associées. Cette approche combinée à notre équipement de mesure sophistiqué a

permis d'éliminer les sources d'erreurs inhérentes aux mesures directes sur l'oscilloscope, ce qui a considérablement amélioré la précision de nos mesures.

4.8 Tests en fréquence variable de 100 à 500 Hz

4.8.1 Procédé de test

Après avoir confirmé la fiabilité de notre banc d'essais dans l'évaluation de la classe de précision à vide, pour les fréquences de 50 Hz et 60 Hz, nous avons entamé des tests à fréquence variable. Pour cela, nous avons injecté à chaque point de mesure un fondamental dont la fréquence varie de 50 à 500 Hz avec un pas de 10 Hz. Aussi, nous avons utilisé le même procédé d'acquisition de données par FFT décrit dans la section 4.7.2. À chaque point de mesure, nous avons généré une fiche de données complète, similaire à celle présentée sur la figure 4.14.

L'objectif de ces nouveaux tests est d'observer l'évolution de la tension primaire et celle secondaire, du rapport de transformation, de l'erreur de rapport et celle de phase en fonction de la fréquence et de la tension appliquée. Cette étude a nous permis, en fait, de caractériser plus précisément les performances fréquentielles du transformateur sur une plage plus assez étendue de conditions de fonctionnement.

Ces tests ont constitué le point clé de notre étude. Ils nous ont permis d'approfondir notre compréhension quant aux performances du transformateur sur une plage de fréquences assez étendue. Ils nous ont permis, également, de collecter des données précises sur le rapport de transformation, l'erreur de rapport et celle de phase, ce qui a renforcé, à notre sens, notre évaluation de la classe de précision et notre confiance dans les performances du transformateur.

4.8.2 Résultats obtenus

La figure 4.15 illustre l'évolution de la tension primaire, de celle secondaire, du rapport de transformation, de l'erreur de rapport et de celle de phase en fonction de la fréquence d'alimentation.

4.8.3 Analyse des résultats

Nous observons que la variation de la fréquence a une influence sur les tensions primaire et secondaire du transformateur T_2 , et cela impacte, de la même manière, les trois niveaux de tension. En augmentant la fréquence, nous remarquons une augmentation linéaire tant de la tension primaire que celle secondaire.

Nous constatons, d'autre part, une diminution du rapport de transformation avec l'augmentation de la fréquence. Cette diminution s'explique par le fait que le gradient de la tension secondaire est plus élevé que celui de la tension primaire. De plus, des sauts sont observés dans la variation du rapport de transformation aux fréquences de 100, 200 et 300 Hz. Ces sauts pourraient être attribués au changement du calibre de l'alimentation électronique.

Nous observons, également, une augmentation de l'erreur de rapport et de celle

de phase en fonction de la fréquence. L'erreur de rapport dépasse la limite de 0,2% à 200 Hz, de même celle de phase dépasse la limite de $0,116^\circ$. Ces constatations sont valables pour les trois niveaux de tension adoptés pour ce test. La déviation de l'erreur pourrait être attribuée aux effets capacitifs et inductifs qui deviennent plus importants à mesure que la fréquence augmente.

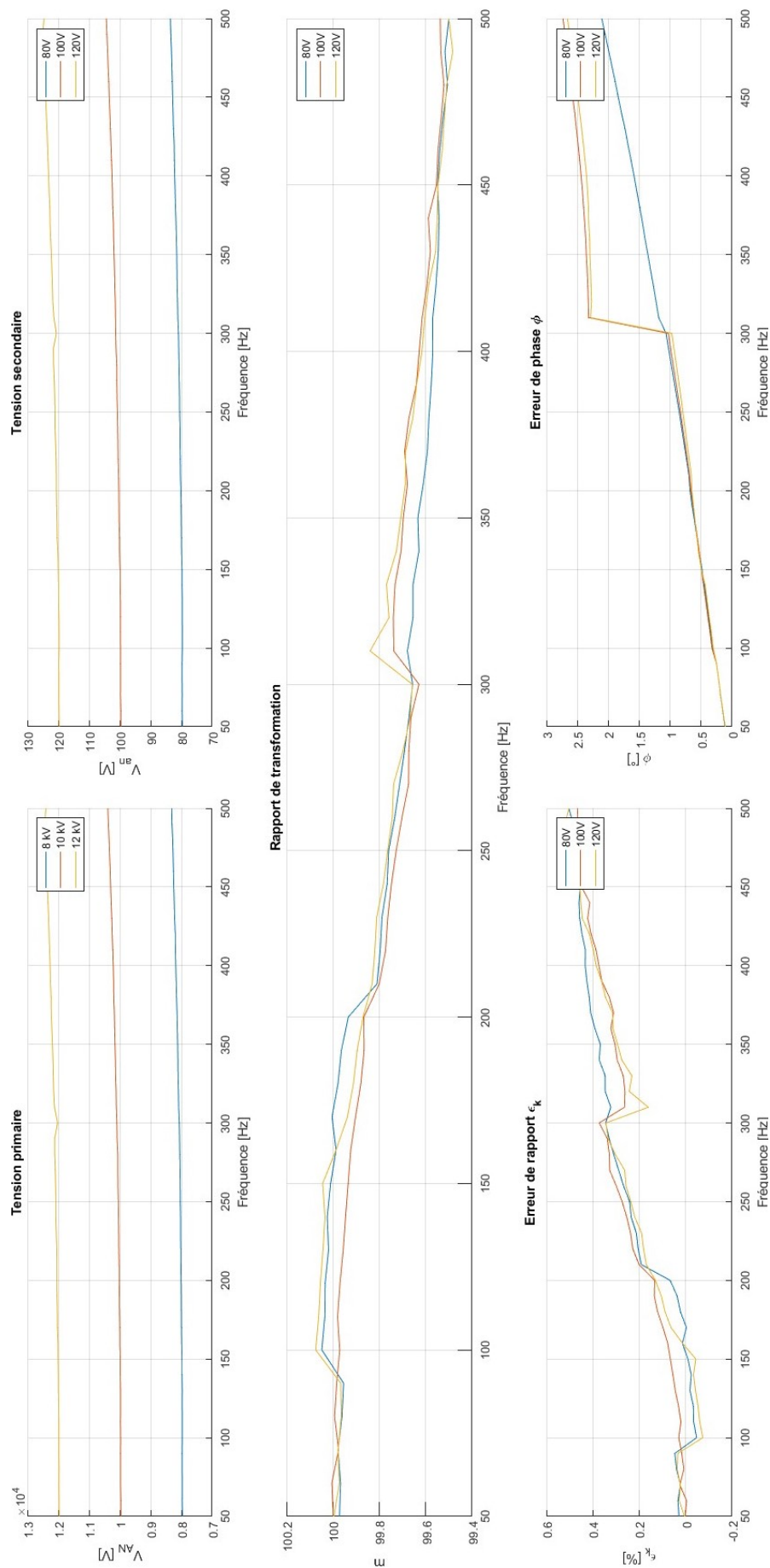


FIGURE 4.15 – Tracés de la tension primaire V_{AN} , la tension secondaire V_{EB} , le rapport de transformation m , l'erreur de rapport ϵ_k (%) et l'erreur de phase $\Delta\phi$ ($^\circ$) en fonction de la fréquence

4.9 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux essais effectués au niveau du LSEE. En premier lieu, nous avons essayé d'arriver, par étapes, à un banc d'essai capable de reproduire le test de précision à fréquence 50 Hz réalisé à la SADTEM. Le premier banc est constitué du transformateur d'essai de type Y12P, alimenté depuis son secondaire (donc en mode élévateur) par une source électronique, de deux sondes BT et HT pour la mesure des tensions primaire et secondaire respectivement, d'un oscilloscope ayant une résolution de 8 bits permettant l'enregistrement des signaux des tensions et d'un thermomètre pour la mesure de la température.

Nous avons constaté que l'erreur de rapport était trop grande que celle requise par la classe de précision de 0,2, la tension au niveau du secondaire du transformateur était inférieure à celle fournie par l'alimentation suite à l'utilisation de la sonde BT, la résolution de l'oscilloscope de 8 bits s'avère insuffisante pour garantir la précision désirée, et finalement, la sonde HT nécessite un étalonnage permettant d'obtenir des mesures fiables.

Dans le banc d'essais amélioré, nous avons remplacé la sonde BT par une autre électronique et l'oscilloscope par un autre plus performant ayant une résolution de 16 bits, et nous avons étalonné la sonde HT. L'erreur de rapport a été trouvée, pour tous les points de mesure, inférieure à 0,2. La tension au niveau du secondaire du transformateur a été corrigée. En complément, un programme Matlab a été établi. L'erreur numérique fournie par ce programme est trop forte que celle calculée analytiquement depuis la lecture sur l'oscilloscope. Un tel écart est justifié par la variation instantanée des valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire sur l'oscilloscope et de l'alimentation du transformateur d'essai par son secondaire affectant la mesure.

Dans le banc final, cette alimentation a été remplacée par un transformateur identique alimenté par son secondaire. Ce transformateur alimente, à son tour, le primaire du transformateur d'essai. Le courant primaire de ce dernier a été mesuré par une sonde de courant ajoutée à cet effet. Les erreurs de rapport et de phase obtenues ont été diminuées à moins de 0,1% et de 10 min respectivement, sur l'oscilloscope le banc d'essais final.

Ce banc a été utilisé pour les tests à fréquence variable de 50 Hz et 500 Hz. Il a été constaté qu'avec l'augmentation de la fréquence, les valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire augmentent linéairement, le rapport de transformation diminue, les erreurs de rapport et de phase augmentent. Cependant, à partir de 200 Hz, la classe deux n'est plus vérifiée du fait que l'erreur de rapport et celle de phase deviennent supérieures à 0,2% et à 10 min respectivement.

Chapitre 5

Conclusion générale et perspective

5.1 Conclusion générale

Le travail que nous avons effectué, dans le cadre de notre mémoire de projet de fin d'études, a porté sur le dimensionnement, la construction, les tests de précision à fréquence industrielle et la caractérisation fréquentielle d'un transformateur de mesure de tension Y12P. Le dimensionnement du transformateur Y12P a été effectué, en utilisant un calculateur approprié, et développé par la SADTEM. A partir des spécifications (en particulier, les tensions primaire et secondaire, la fréquence, la charge et classe de précision) mentionnées dans le cahier de charge établi par le LSEE, le calculateur a fourni les paramètres nécessaires au dimensionnement du transformateur. Il s'agit des informations générales de la conception et la nature du noyau magnétique, du nombre de spires et de couches des enroulements primaire et secondaire, de la nature et l'épaisseur du papier isolant (entre les couches d'un même enroulement et entre les enroulements primaire et secondaire) et de l'erreur de rapport et de phase du transformateur. De plus, ce calculateur permet d'effectuer les corrections sur nombre de spire afin d'améliorer l'erreur de rapport.

Au niveau de la SADTEM, la construction du transformateur s'est effectuée en plusieurs étapes à savoir, le bobinage des enroulements primaire et secondaire, l'assemblage des colonnes du noyau magnétique sur les enroulements, l'application d'une couche de liège protectrice sur le noyau magnétique (gansage), et le moulage. Cependant avant cette dernière étape (moulage), des tests de performances (en déterminant le schéma équivalent) et de détection d'éventuelles erreurs de construction, en particulier les courts-circuits, ont été effectués à fréquence industrielle (50 et 60 Hz), à l'aide du VOTANO 100. Les mêmes tests ont été effectués après construction du transformateur, pour servir comme référence dans l'élaboration du banc d'essais au niveau du LSEE. Il ressort des étapes du dimensionnement et de construction du transformateur, les principales conclusions suivantes :

- Les nombres finaux (après correction) de spires des enroulements primaire et secondaire sont : $N_1 = 26951$ et $N_2 = 270$.
- La classe de précision de 0,2 est validée pas les tests finaux, utilisant le VOTANO 100, du fait que l'erreur de rapport est dans l'intervalle $[-0,1079 ; 0,0530]$ %, et l'erreur de phase dans $[2,19 ; 3,79]$ min.
- Les éléments du schéma équivalent ramenés au secondaire, déterminés par le VOTANO 100, sont les suivants : $R'_1 = 1,1183\Omega$ (résistance de l'enroulement primaire ramenée au secondaire); $X'_1 = 0,7020\Omega$ (réactance de l'enroulement primaire ramenée au secondaire); $R_2 = 0,9272\Omega$ (résistance de l'enroulement secondaire); $X_2 = 0,0957\Omega$ (réactance de l'enroulement secondaire).
- La courbe de magnétisation du transformateur est linéaire entre 0,0011 A et 0,1 A. A partir de cette dernière valeur (0,1 A), le noyau commence à se saturer.

Au niveau du LSEE, le challenge était de proposer un banc d'essais capable de reproduire le même test de précision à fréquence industrielle (50 et 60 Hz) que celui effectué à la SADTEM et avec la même classe de précision de 0,2. Le banc final a été obtenu après deux améliorations apportées au banc d'essais de démarrage (initial),

soit après trois versions d'essais, notées : essai 1, essai 2 et essai 3.

Le banc de l'essai 1 a été utilisé pour estimer l'erreur de rapport sur une plage de tension au secondaire allant de 10 V à 105 V. Le transformateur, branché en mode élévateur, a été alimenté du côté basse tension avec une source tension électronique (KEYSIGHT AC6802B). Deux sondes BT (TEKTRONIX P5205) et HT (TEKTRONIX P6015A) ont été utilisées pour mesurer la tension primaire et celle secondaire respectivement. Leurs signaux ont été enregistrés en employant un oscilloscope (TEKTRONIX MSO4034) ayant une résolution de 8 bits. Un thermomètre (FLUKE 52 II) est utilisé pour surveiller l'évolution de la température. Les points à retenir de l'essai 1 consistent en :

- L'erreur de rapport, calculée analytiquement, a été en dehors de la classe de précision.
- La sonde BT entraîne une chute de tension considérable à la sortie de l'alimentation.
- La résolution de l'oscilloscope de 8 bits est insuffisante pour garantir la précision désirée.
- La sonde HT nécessite un étalonnage en vue d'obtenir des mesures fiables.
- Le thermomètre a délivré des valeurs erronées (affichage de 2500 °C pour une tension d'alimentation de 120 V) suite aux influences CEM provenant du champ magnétique.

Le banc d'essais a été amélioré en effectuant deux remplacements : la sonde BT par une autre électronique (TEKTRONIX TPP1000) et l'oscilloscope par un autre plus performant (TEKTRONIX MSO58) doté d'une résolution de 16 bits. En outre, la sonde HT a été étalonnée. Dans ces conditions, l'erreur de rapport estimée analytiquement à travers la lecture directe sur l'oscilloscope, est en dessous de 0,2%, et ce pour tous les points de mesure. La chute de tension au niveau du primaire du transformateur a été éliminée. En outre, un programme sous environnement Matlab a été mis en uvre pour nous fournir, aisément et avec plus de précision, l'erreur de rapport. Ainsi, nous avons retenu les principales conclusions suivantes :

- La lecture directe sur l'oscilloscope n'est pas fiable, du fait de la variation instantanée des valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire.
- L'alimentation du transformateur par son secondaire a affecté la mesure.
- L'absence d'information sur l'erreur de phase tout au long de la campagne de mesure pourrait compliquer l'interprétation des résultats.
- Un écart entre les estimations analytique et numérique de l'erreur a été enregistré. Ce qui nous a amené à améliorer davantage le banc d'essais, soit le procédé expérimental.

Ainsi, le banc d'essai final a été obtenu en branchant deux transformateurs identiques, notés T1 et T2, de type Y12P. Alimenté par son secondaire, le transformateur T1 alimente, à son tour, le primaire du transformateur d'essai T2. Le courant primaire du transformateur de test est mesuré via une sonde additionnelle. L'acquisition a consisté à enregistrer, pour chaque signal de tension, 1,25 million de points par seconde (équivalent à 50 cycles de 50 Hz). Une analyse spectrale via la FFT a été utilisée en vue de déterminer (i) les valeurs efficaces des fondamentaux des

tensions primaire et secondaire d'une part, et du courant primaire d'autre part, et (ii) les déphasages tension primaire-tension secondaire et tension primaire-courant primaire. Les résultats ainsi obtenus ont montré une nette amélioration dans l'estimation de la précision de mesures, du fait que les erreurs de rapport et de phase ont été réduites à moins de 0,1% et de 10 min (soit $0,116^\circ$) respectivement, et ce pour tous les points de mesure. Ce qui confirme la validité du dernier banc d'essais amélioré pour les mesures à 50 et 60 Hz.

Avec ce banc d'essais, nous avons entamé les tests à fréquence variable. Pour cela, nous avons alimenté le transformateur par une sinusoïde, dont la fréquence a été variée de 50 Hz et 500 Hz, par pas de 10 Hz. En fait, nous avons considéré trois niveaux de tension d'alimentation à savoir 80, 100 et 120 V. Pour chaque valeur, nous avons suivi l'évolution des tensions primaire et secondaire, du rapport de transformation, de l'erreur de rapport et celle de phase en fonction de la fréquence. Nous avons retenu les principales conclusions suivantes :

- Pour une tension d'alimentation donnée, les valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire augmentent linéairement avec la fréquence.
- L'augmentation de la fréquence engendre une diminution du rapport de transformation. Par ailleurs, les sauts observés, aux fréquences de 100, 200 et 300 Hz, seraient dus au changement du calibre de l'alimentation électronique.
- L'augmentation de la fréquence induit à une augmentation de l'erreur de rapport et de celle de phase. Cependant, l'erreur de rapport dépasse la limite de 0,2% à partir de 200 Hz, de même celle de phase dépasse la limite de 10 min ($0,116^\circ$), et ce pour les trois niveaux de tension adoptés. Ceci pourrait être attribuée aux effets capacitifs et inductifs qui s'accroissent pour les hautes fréquences.

5.2 Perspective

Nous recommandons, pour les travaux à venir, l'utilisation d'une alimentation purement analogique permettant d'effectuer les essais pour une large bande de fréquences, en tenant compte de tous les phénomènes perturbateurs liés au champ d'application des transformateurs de mesure. À cet égard, nous proposons de réaliser les tests selon la procédure décrite sur la figure 5.1.

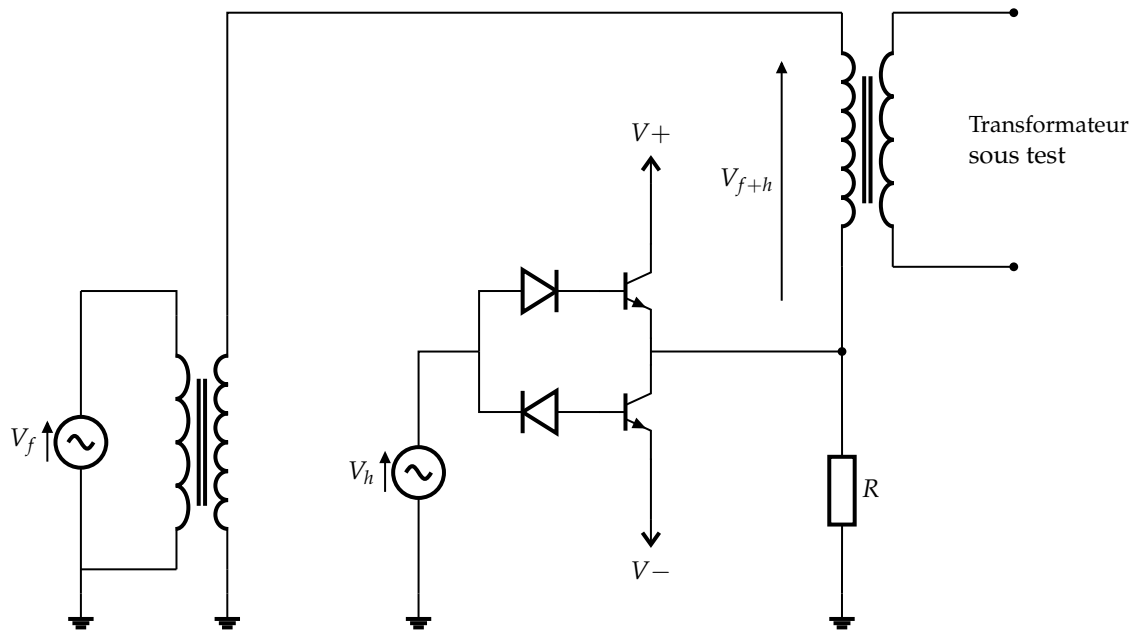


FIGURE 5.1 – Circuit de test proposé

La procédure proposée consiste à utiliser deux sources de tension indépendantes pour alimenter le transformateur de test. La première source, notée V_f , génère une tension à une fréquence de 50 Hz afin de magnétiser le transformateur à sa fréquence nominale de magnétisation. Cette source de tension est connectée à un transformateur élévateur qui fournit la tension moyenne à l'enroulement primaire du transformateur sous test. La deuxième source, notée V_h , génère des tensions harmoniques sur une large bande de fréquences. Elle est connectée à un amplificateur qui élève la tension et injecte les harmoniques dans le primaire du transformateur à tester. Ainsi, notre transformateur sera magnétisé à 50 Hz avec une superposition d'harmoniques sur le fondamental. Cette configuration reflète un cas réel des réseaux électriques pollués en harmoniques.

Annexe A

**Fiche technique commerciale du
transformateur Y12P SADTEM**

Y12P

TRANSFORMATEUR DE TENSION INTERIEUR MOYENNE TENSION



CARACTERISTIQUES GENERALES

Transformateur de tension 1 pôle isolé, compact et à isolement sec pour usage intérieur.

- ✓ Norme : CEI 61869-3
- ✓ Température ambiante : jusqu'à -25/+40°C

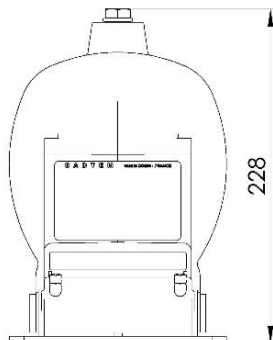
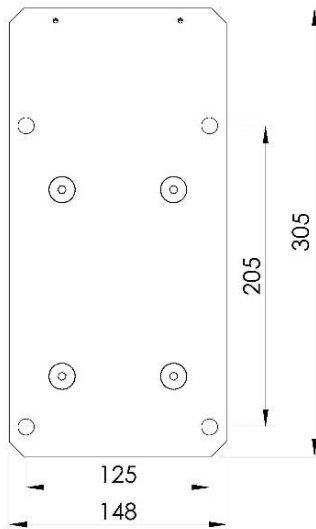


CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES

- ✓ Niveau d'isolement : jusqu'à 17.5/38/95kV
- ✓ Fréquence : 50Hz | 60Hz
- ✓ Tension primaire (U_n) : jusqu'à $17500/\sqrt{3}V$
- ✓ Facteur de tension : 1.5 ou 1.9 U_n | 30s ou 8H
- ✓ Classe de précision : 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1 | 3 | 3P | 6P
- ✓ Puissance de précision : jusqu'à 10VACL0.2-50VACL0.5-100VACL1
- ✓ Enroulement d'amortissement : sur demande
- ✓ Puissance thermique : jusqu'à 250VA



ENCOMBREMENT



CARACTERISTIQUES MECANIQUES

- ✓ Masse approximative : 15kg
- ✓ Sortie de câble : PG16
- ✓ Avec capot plombable



OPTIONS



- ✓ Embase courte sans capot plombable
- ✓ Porte fusible avec fusible primaire

Dimensions en mm

Informations données à titre indicatif. Pour tout autre caractéristique ou besoin, nous consulter.

SADTEM

TRANSFORMATEURS ELECTRIQUES DE MESURE

671, Rue Maurice Caullery - ZI Douai Dorignies - 59506 DOUAI cedex - France
Tél.: (33) 03 59 61 15 60  www.sadtem.com  contact@sadtem.com

Annexe B

**Fiche de dimensionnement générée
par le calculateur SADTEM**

** CALCUL DES TT METRI-CAD 2 - VER. 2.0.0.0 ** SPEC.: Y12P 21/03/2023
15:54:51

TT TYPE Y12P Tension de choc: U60 50 Hz - Norme: IEC - Config: 110
10000/100.0V 10VA Cl 0.2
Facteur de tension= 1.9/08h

MOTEUR Y12P Toile M5X -Radial= 34.0 Largeur 50- 1 C-Section= 16.3 cm2
Hauteur fer Hf= 117.0 Largeur fenetre hF= 50.0 Entrefer= 0.05 Masse= 5.40 kg
Induction a $1.9 \cdot U/\sqrt{3}$ = 1.962 T; V/tour a $U/\sqrt{3}$ = 0.370 Long.devel.caniveau= 200
Sec.sur 102 - Prim. 1 bobine - Papier l= 93 - Crantage= 7,11 - Rad.max.P+B+S= 33.0

SECONDAIRE(S):

270 t.en 4 couches 1 fois 1.18 Ep= 5.7 L= 102 Masse= 0.588

PRIMAIRE 26951 tours, fil 0.125 mm, masse 0.852 kg en 1 bobine(s) de
29 couches de 512 tours, crantage= 7
26 couches de 461 tours, crantage= 11
Derniere couche partielle= 117 tours repartis. Total= 56 couches
Entre-couches:papier 2*4I centiemes Largeur= 93 Masse= 0.108

BOURRAGE: Epaisseur 1 Papier HW 10 cent. largeur= 112 Masse= 0.020

PARAMETRES:Tension entre couches en service= 379V
Hbob moy= 89mm - Resistance primaire= 10190 Ohms
Resist. Pr/S= 1.019;secondaire = 0.92; totale= 1.939 Reactance 0.554 Ohm
Diametre hors tout des bobines= 112 mm Radial= 22.9

Iter= 0 Fils:dia P:0.125 Section Sec 1: 1.1 et 0 ; Sec 2: 0 mm2

VERIF.

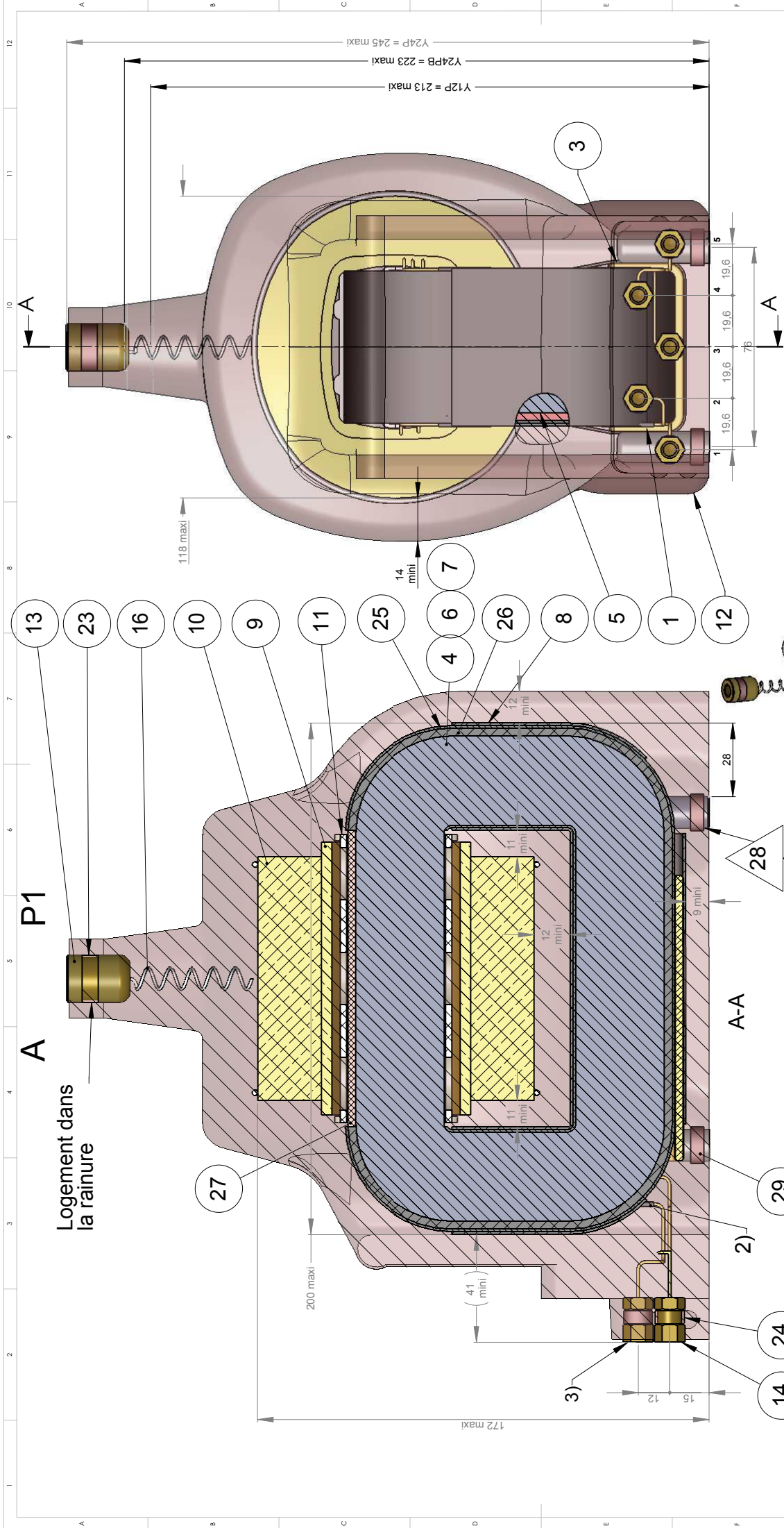
Sec 1 Rapport: 10000/100.0V 10VA Cl .2 volts/tour= 0.370
Induction a $U/\sqrt{3}$ = 1.022 T; a $1.9 \cdot U/\sqrt{3}$ = 1.942 Tesla

	Err 0	Deph. 0	Err.%	Deph.mn	Er.corrig%
Charge seule			-0.19	2	
Pn 0.8*Un	-0.10	3	-0.29	6	-0.292
Pn/4 0.8*Un	-0.10	3	-0.15	4	-0.151
Pn Un	-0.10	3	-0.29	6	-0.289
Pn/4 Un	-0.10	3	-0.15	4	-0.148
Pn 1.2*Un	-0.11	4	-0.30	6	-0.295
Pn/4 1.2*Un	-0.11	4	-0.15	4	-0.154

Correction primaire= 0.18 % , secondaire= 0 totale= 0.18
Erreur corrigee a .8*Un,Pn/4= 0.029 -a 1.2*Un,Pn= -0.115

Annexe C

**Dessin technique de conception de
transformateur SADTEM Y12P**



Logement dans la rainure

- 1) Arrêt des gaines isolantes
 - 2) la gaine doit sortir de 10mm par rapport au semi-conducteur
- TOLERANCE SUIVANT ISO 2768 - m sauf indications contraires

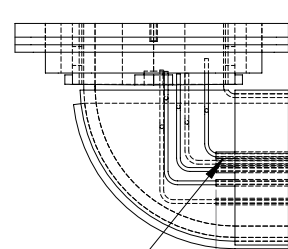
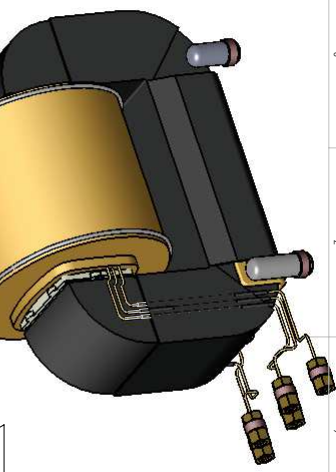
J 14/11/14 MODIFS SELON SMO32199
 A. 23/10/87 EDITION ORIGINALE

Date: 23/10/1997
 Dessiné: HUEBER
 DRN: Vérifié par: THIEFFRY-DELVILLE
 CHKD:

Type - COMP Y24P (Y24PB & Y12P)
 Matière:
 Finition:
 Echelle:
 Scale:
 SADTEM
 N°32199

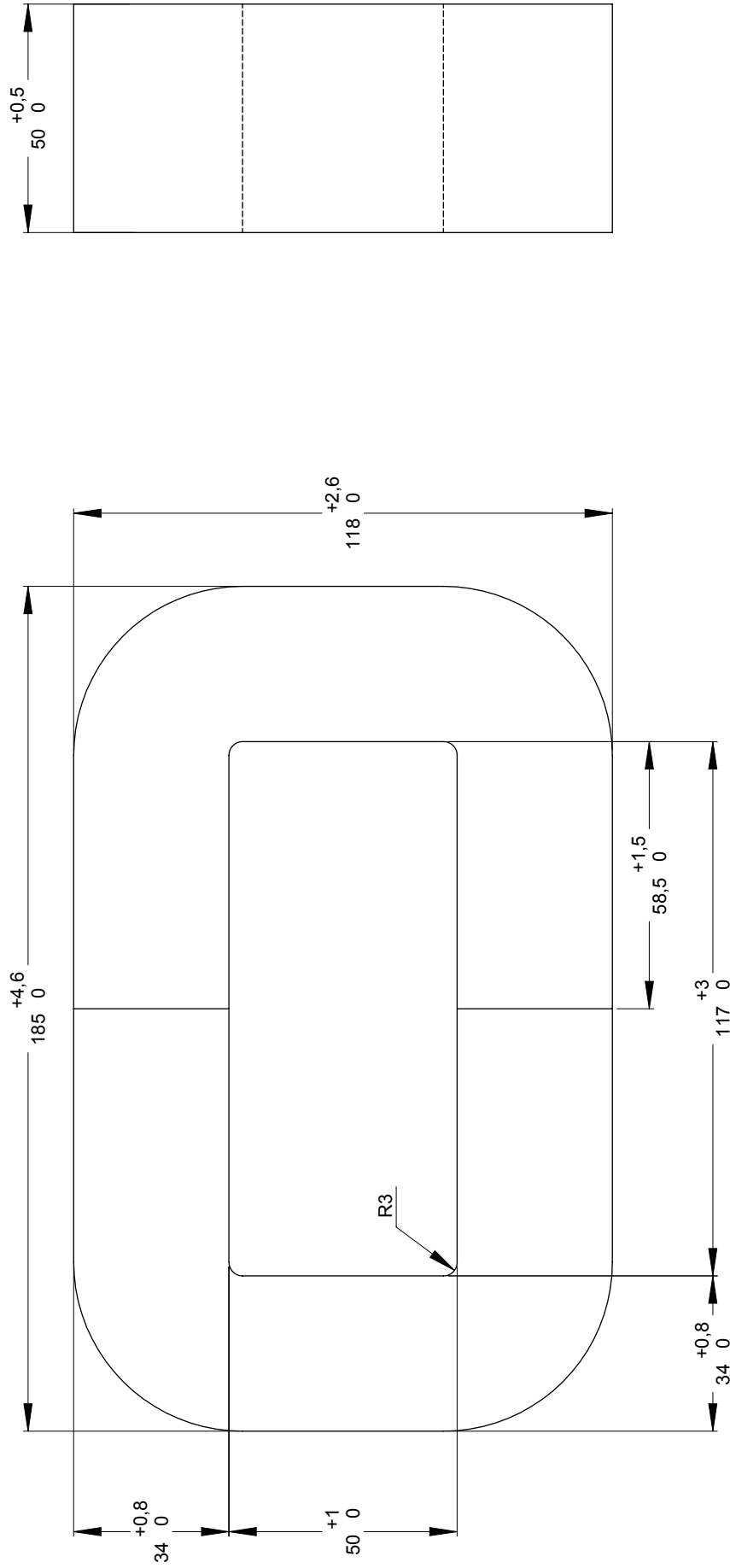
Destination: BE - USC - UT - PDF

Propriété exclusive de SADTEM. Remis à titre confidentiel, aucune partie ne peut être reproduite, utilisée ou communiquée sans autorisation écrite de SADTEM.
 The present document is the exclusive property of SADTEM, confidentially handled, it can't be communicated to third party, neither used or reproduced without his written agreement.



Annexe D

**Dessin de technique de conception du
noyau magnétique du transformateur
SADTEM Y12P**



TOLERANCE SUIVANT ISO 2768 -m

MODIFICATIONS SUIVANT SMO31795

C 27/10/14 SH
B 11/12/08 SH
A 06/03/1997

EDITION ORIGINALE

Dessiné: HUEBER
DRN:

Vérifié par: THIEFFRY
CHKD:

Type : COMP

YM6 VSE12 Y12G/AE Y12G-C1 VSZ12 V12P Y12P
Y24P Y24PB Y16C36/AJA OYF12-1 Y66 YE6C1/AE

Matière: CDCF001

Finition:

842C131795

CIRCUIT MAGNETIQUE COUPE
TORE: 50X117 RAD:34 LARG:50



Masse : 5.38kg

Destination: CAT - U7 - SA - [PDF]

Propriété exclusive de SADTEM. Remis à titre confidentiel, aucune partie ne peut être reproduite, utilisée ou communiquée sans
The present document is the exclusive property of SADTEM, confidentially handed, it can't be communicated to third party, neither
used or reproduced without his written agreement.


Feuille:


Annexe E

Rapport de test au VOTANO 100

Annexe F


**Bon de commande de fabrication
SADTEM**


n° Lancement 447759 110	Quantité 2.00	Date édition 22/03	Date début 08/03/23	Date fin 15/03/23	BON D'OPÉRATION			sem:10
Code article 20771711729	Désignation 1 MY12P 10000//100		N° Plan 32199		Observations Y12P			
Code article niveau 1 10771711729V43	Désignation 2 10VACLO.2		N° Cde client 162386 10		01/01 651666-651667			
Code section - poste 26 7410 Bob.sec TT	Code opérat. 10	Délai opérat. 1	08/03/23	T.U. 25.00	T.R. .00	T.P.	T.T.A. 50.00	
<p>SECONDAIRE CANIVEAU PL.38329 52x38 EP2.5 LONG.110 (5) **DEPART A GAUCHE EN 4C SUR 102 MM (1) ---XXXXXX\ /XXXXX/ \XXXXX\ (4) ---XXXXXX/ ENTRE P ET S BOURRAGE EP.1MM LARG.110</p>								
12	Destinataire U7-TT	ISOL.: 12/28/75						

n° Lancement 447759 110	Quantité 2.00	Date édition 22/03	Date début 08/03/23	Date fin 15/03/23	BON D'OPÉRATION			sem:10
Code article 20771711729	Désignation 1 MY12P 10000//100		N° Plan 32199		Observations Y12P			
Code article niveau 1 10771711729V43	Désignation 2 10VACLO.2		N° Cde client 162386 10		01/01 651666-651667			
Code section - poste 26 7420 BobPr_RMR	Code opérat. 30	Délai opérat. 1	08/03/23	T.U. .00	T.R. .00	T.P.	T.T.A. .00	
<p>ENCOMBREMENT BOBINE THEORIQUE ET RESISTANCE SECONDAIRE + BOURRAGE = 6.7 mm PRIMAIRE = 16.2 mm 9171 ohm < Rprim. < 12228 ohm 0.82 ohm < Rsecd. < 1.11 ohm</p>								
14	Destinataire U7-TT	ISOL.: 12/28/75						

U5L	Idem avant essais	(ID+stagiaire)

DG _____ Date _____

BE  Date 21/03/22

Planning  Date 21/03/23

BE _____ Date _____

Informez DG et BE des résultats techniques. Les résultats de la qualification sont également transmis au planning

Bibliographie

- [1] AB ABB. « Instrument Transformers Application Guide ». In : *Ludvika, Sweden* (2009).
- [2] SADTEM WEBSITE. URL : <https://www.sadtem.com/fr/entreprise/>.
- [3] James H. HARLOW. *Electric Power Transformer Engineering, Third Edition*. 3rd. The Electric Power Engineering Handbook. CRC Press, 2012. ISBN : 143985629X; 9781439856291.
- [4] International Electrotechnical COMMISSION et al. « IEC 61869-1 Power transformers–Part 1 : General ». In : *International Electrotechnical Commission* (2011).
- [5] International Electrotechnical COMMISSION et al. « IEC 61869-3 Additional Requirements for Inductive Voltage Transformers ». In : *IEC : Geneva, Switzerland* (2011).
- [6] Stefan TENBOHLEN et al. « Diagnostic measurements for power transformers ». In : *Energies* 9.5 (2016), p. 347.
- [7] Tian LIU. « Manoeuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux rémanent. » Thèse de doct. Supélec, 2011.
- [8] shutterstock. Site de photos sous licences. <https://www.shutterstock.com/fr>.
- [9] J DEGAUQUE. « Magnétisme et matériaux magnétiques : introduction ». In : *Le Journal de Physique IV* 2.C3 (1992), p. C3-1.
- [10] J-C BAVAY et J VERDUN. « Les aciers électriques pour transformateurs et machines tournantes. Situation actuelle et perspectives ». In : *Le Journal de Physique IV* 2.C3 (1992), p. C3-37.
- [11] Robert M DEL VECCHIO et al. *Transformer design principles : with applications to core-form power transformers*. CRC press, 2017.
- [12] SK SAHDEV. *Electrical machines*. Cambridge University Press, 2017.
- [13] SYR HUI et J ZHU. « Numerical modelling and simulation of hysteresis effects in magnetic cores using transmission-line modelling and the Preisach theory ». In : *IEE Proceedings-Electric Power Applications* 142.1 (1995), p. 57-62.
- [14] H OUADDI et al. « Étude des courants de Foucault dans un transformateur de faible puissance : une première approche de la modélisation des sous-stations d'alimentation ferrovière ». In : *14ème Colloque International sur la Compatibilité Electromagnétique, CEM08*. Mai 2008, p. 224-226.

- [15] D.P. ROMMEL, Dario DI MAIO et Tiedo TINGA. « Transformer hot spot temperature prediction based on basic operator information ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 124 (jan. 2021), p. 106 -340. DOI : [10.1016/j.ijepes.2020.106340](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106340).
- [16] Jean Pierre DUPRAZ. *Transformateurs de mesure*. Ed. Techniques Ingénieur, 2003.
- [17] Ahmad AHMAD. « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute fréquence ». Thèse de doct. Ecole Centrale de Lyon, 1992.
- [18] Paresh Chandra SEN. *Principles of electric machines and power electronics*. John Wiley & Sons, 2021.
- [19] Saleh TABAGA. « Modélisation du comportement fréquentiel du transformateur. Détermination des paramètres du schéma équivalent par la méthode des éléments finis en géométrie 2D et 3D ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), 1995.
- [20] Théodore WILDI. *Électrotechnique (4e édition)*. Presses de l'université Laval, 2005.
- [21] Jean SANCHEZ. « Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance ». Theses. Université de Grenoble, juin 2011. URL : <https://theses.hal.science/tel-01017179>.
- [22] ABB. « Changeurs de prises en charge ». In : *ABB technical sheet* ().
- [23] Frédéric MAZALEYRAT. « Matériaux magnétiques doux pour la conversion dénergie ». In : *Journée Ciblée sur une Thématique JCT 1 «Matériaux innovants pour la conversion d'énergie»*.
- [24] Ruthard MINKNER et Joachim SCHMID. *Technology of Instrument Transformers*. Springer, 2022.
- [25] Jamie BERROSTEGUIETA et A ENZUNZA. « Theory and technology of instrument transformers ». In : *Discharge of Capacitor Bank, Training Booklet 2* (2020), p. 27.
- [26] Rudolf WOSCHITZ. *State of the Art of Instrument Transformers*. English. T. 394. CIGRE Brochure. CIGRE SC A4. , 2009. ISBN : 978-2-85873-081-0.
- [27] H ADLER. « Ein hochstabilisierter 1, 5 MeV Elektronenbeschleuniger ». In : *Proceedings of the Second European Conference on Electron Microscopy*. De Nederlandse Vereniging voor Elektronenmicroscopie. 1960, p. 122-125.
- [28] Antonio CATALIOTTI et al. « Compensation of nonlinearity of voltage and current instrument transformers ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 68.5 (2018), p. 1322-1332.
- [29] T. PFAJFAR et al. « Influence of instrument transformers on harmonic distortion assessment ». In : *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. IEEE, 2012. DOI : [10.1109/pesgm.2012.6345309](https://doi.org/10.1109/pesgm.2012.6345309).

- [30] Palma Sara LETIZIA et al. « Low cost procedure for frequency characterization of voltage instrument transformers ». In : *2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE, 2019, p. 1-6.
- [31] G CROTTI et al. « A simplified procedure for the accurate frequency response identification of voltage transformers ». In : *24th IMEKO TC4 International Symposium and 22nd International Workshop on ADC and DAC Modelling and Testing 2020*, 2020, p. 50-54.
- [32] G CROTTI et al. « A new industry-oriented technique for the wideband characterization of voltage transformers ». In : *Measurement* 182 (2021), p. 109674.
- [33] G. CROTTI et al. « Measurement Methods and Procedures for Assessing Accuracy of Instrument Transformers for Power Quality Measurements ». In : *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*. IEEE, 2020. DOI : [10.1109/cpem49742.2020.9191698](https://doi.org/10.1109/cpem49742.2020.9191698).
- [34] Marco FAIFER et al. « Overcoming Frequency Response Measurements of Voltage Transformers : An Approach Based on Quasi-Sinusoidal Volterra Models ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 68.8 (2019), p. 2800-2807. DOI : [10.1109/tim.2018.2871229](https://doi.org/10.1109/tim.2018.2871229).
- [35] Dhanasekharan NATARAJAN. *ISO 9001 Quality management systems*. Springer, 2017.
- [36] OMICRON ENERGY. « VOTANO 100 : Test, étalonnage et évaluation des transformateurs de tension ». In : *OMICRON Technical Sheet* (2020).
- [37] Dr. Martin Anglhuber FLORIAN PREDL Dr. Michael Freiburg. « Mesures de diagnostic sur les réducteurs de mesure ». In : *OMICRON ENERGIES Article du mois* (octobre 2019).