

Étude du réseau électrique du campus universitaire : impact
de l'installation des stations de recharge pour les véhicules
électriques

par

Maroua FATHALLAH

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 14 FÉVRIER 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Maroua Fathallah, 2017

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Kamal Al-Haddad, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Louis-A. Dessaint, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. François Ruelland, membre du jury externe
Société de transport de Montréal STM

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 JANVIER 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé sous la direction et l'encadrement de mon directeur de recherche ; Monsieur Kamal Al-Haddad et ce au sein du laboratoire Groupe de Recherche en Électronique de Puissance et Commande Industrielle GREPCI qui fait partie du département de génie électrique de l'école de technologie supérieure ÉTS et en collaboration avec le service de la gestion des actifs immobiliers de l'ÉTS sous la supervision de Monsieur Javier Beltran-Galindo.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de recherche Monsieur Kamal Al-Haddad, professeur à l'École de technologie supérieure ÉTS, pour son encouragement, son encadrement et son soutien continu sur tous les plans tout en fournissant toutes les ressources nécessaires pour la réalisation de ma maîtrise avec mémoire au sein de l'École de technologie supérieure ÉTS.

Je remercie Monsieur Louis-A. Dessaint professeur et membre du groupe de recherche en électronique de puissance et commande industrielle GREPCI à l'ÉTS, ainsi que Monsieur François Ruelland, employé de la société de transport de Montréal STM, d'avoir accepté de faire partie des membres du jury de mon mémoire.

En plus, je remercie Monsieur Javier Beltran-Galindo, Ingénieur dans le service de la gestion des actifs immobiliers à l'école de technologie supérieure ÉTS. Grâce à son assistance appréciée, il nous était possible de coordonner d'une part avec le service mentionné précédemment afin de pouvoir réaliser toutes les mesures en pratique, et d'autre part avec certaines compagnies industrielles comme General Electric GE Consumer & Industrial et Schneider Electric pour qu'elles nous procurent toutes les données et informations nécessaires dans le cadre de la réalisation de ma maîtrise.

D'autre part, je tiens à exprimer ma gratitude envers Monsieur Emmanuel Coulombe, Technicien en électrotechnique au service de la gestion des actifs immobiliers à l'ÉTS, pour son investissement et son aide afin d'effectuer toutes les mesures pratiques au sein de tout le campus universitaire.

Et finalement, je remercie Monsieur Rawad Zgheib, doctorant à l'ÉTS, pour ses conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ma maîtrise.

ÉTUDE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU CAMPUS UNIVERSITAIRE : IMPACT DE L'INSTALLATION DES STATIONS DE RECHARGE POUR LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Maroua FATHALLAH

RÉSUMÉ

L'industrie a connu un développement révolutionnaire dans différents secteurs qui a été accompagné du développement de l'électronique de puissance permettant de s'accommoder au mode de vie que nous menons. Néanmoins, ce développement est à double tranchant étant donné qu'il résulte en l'augmentation du risque d'apparition de différentes formes d'anomalies qui pourraient affecter la qualité de l'onde produite et circulant dans le réseau électrique. Pour cela, avant de penser à développer et étendre une installation électrique donnée, il faut s'assurer que cette dernière produit déjà une bonne qualité d'onde tout en identifiant les différents paramètres et équipements qui constituent cette installation mais aussi en effectuant des mesures qui permettent de mettre en évidence les différents aspects et caractéristiques de la qualité d'onde fournie par le réseau électrique considéré. C'est cet esprit et raisonnement que nous avons suivi dans le travail présenté dans ce mémoire. En effet, nous avons entamé notre travail par l'identification des équipements raccordés à l'installation électrique du campus universitaire de l'ÉTS, et plus précisément les transformateurs et les charges qu'ils alimentent. Les données ainsi récoltées suite à la visite effectuée des équipements ont été documentées puisqu'elles serviront par la suite pour la mise à jour du réseau, le calcul des impédances des câbles et des transformateurs dont nous avons besoin pour la simulation du réseau avec SimPowerSystems (SPS) ainsi que pour les mesures réalisées en temps réel avec l'interface Vista Powerlogic de Schneider Electric. Ces mesures sont limitées aux charges alimentées par les transformateurs identifiés auparavant et ayant comme puissances apparentes nominales 100kVA et plus. D'autre part, la simulation du réseau fera appel aux données de profils de puissances obtenues en temps réel avec Vista. Ensuite, une analyse et interprétation des résultats obtenus ont été faites. D'un côté, les résultats des formes d'onde des courants et des tensions des charges, leurs spectres harmoniques et leurs diagrammes de déphasages ont permis de conclure que la qualité d'onde circulant dans le réseau présente quelques perturbations qui se manifestent par la génération des harmoniques des courants et par le déséquilibre des courants des charges entraînant le risque de génération des harmoniques de multiples fréquences notamment l'harmonique de rang 3. D'un autre côté, les résultats des profils des puissances ont permis de conclure que les transformateurs mesurés s'avèrent des équipements surdimensionnés ce qui semble résulter de la circulation des harmoniques de courants de charges. Ce travail a donc permis non seulement de mettre en évidence l'aspect de la qualité d'onde mais aussi d'élaborer une plateforme traduisant le comportement de l'installation électrique du campus universitaire et optimisant ainsi son développement éventuel.

Mots-clés : réseau électrique, qualité d'onde, transformateur, charge, Vista Powerlogic.

STUDY OF THE ELECTRICAL NETWORK OF THE UNIVERSITY CAMPUS: IMPACT OF THE INSTALLATION OF CHARGING STATIONS FOR ELECTRICAL VEHICLES

Maroua FATHALLAH

ABSTRACT

The industry has witnessed a revolutionary development in various sectors which has been accompanied by the development of power electronics to accommodate our lifestyle. Nevertheless, this development is double-edged because it results in an increase of the risk of generating different forms of anomalies that could threaten the power quality produced and circulating in the electrical network. Therefore, before thinking about developing and expanding a given electrical plant, it's important to make sure that the given network already produces a good power quality not only by identifying the various parameters and equipment of the considered electrical plant but also by performing real time measurements in order to highlight the different aspects and characteristics of the power quality provided by the electrical network in question; it's this logic that we have followed along the work presented in this thesis. Indeed, we began our work by identifying all kind of the equipment connected to the electrical network of ETS and by focusing on the transformers and their loads. Moreover, the data that has been collected from the following visit, was documented since it will be useful for the real-time measurements done by using a software designed by Schneider Electric called Vista Powerlogic interface and limited to the loads powered by transformers with nominal apparent power equal to 100kVA and above. Then, these data will also be used for the calculation of the impedance of the cables and transformers needed for the simulation with SimPowerSystems (SPS) of the electrical plant which has been updated thanks to the inventory carried out in the beginning of this study. Plus, in this simulation, we used the power profile data obtained with real time measurements with Vista. In addition, an analysis and interpretation of the results obtained earlier were made: on the one hand the results regarding the waveforms of load currents and voltages, their harmonic spectrum and their phase shift diagrams were discussed and led to conclude that the power quality circulating in the electrical network has various disturbances which mostly are the generation of a high rate harmonic currents and the unbalance of the charge currents which has led to the generation of the harmonics with multiple frequency mainly the rank 3 harmonic current. On the other hand, the results regarding the load power profile measured only across the loads supplied by the high-power transformers have led us to the conclusion that all these transformers are such oversized equipment which seems to be the result from the circulation of load harmonic currents among the network. Hence, it's safe to say that this work was not only able to highlight the aspect of the power quality but also to develop a kind of a platform reflecting the real behavior of the electrical network of the whole campus and allowing to optimize any future development and expansion regarding the studied campus network.

Keywords: electrical network, power quality, transformer, load, ETS university campus.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Compensation des harmoniques et de la puissance réactive dans le réseau électrique.....	5
1.2 Impact de l'introduction des stations de recharge pour les véhicules électriques sur le réseau électrique.....	17
1.2.1 Véhicules électriques hybrides rechargeables PHEVs	17
1.2.2 Véhicules électriques rechargeables PEVs	23
CHAPITRE 2 INVENTAIRE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU CAMPUS UNIVERSITAIRE DE L'ÉTS	29
2.1 Identification des transformateurs électriques installés dans tout le campus et mise à jour de la fiche technique.....	29
2.2 Calcul de l'impédance des transformateurs et des câbles de l'installation électrique du campus universitaire.....	39
2.2.1 Calcul de l'impédance des câbles	39
2.2.2 Calcul de l'impédance des transformateurs	45
CHAPITRE 3 MESURES EXPÉRIMENTALES EN TEMPS RÉEL ET SIMULATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU CAMPUS UNIVERSITAIRE DE L'ÉTS	53
3.1 Mesures Expérimentales Avec le logiciel Vista Powerlogic de Schneider Electric	53
3.1.1 Mesure en temps réel des charges installées dans le pavillon A.....	59
3.1.2 Mesure en temps réel de la charge totale des CLUMEQ installés dans le pavillon A.....	149
3.1.3 Mesure en temps réel de la charge totale du Pavillon B.....	170
3.1.4 Mesure en temps réel de la charge totale du Pavillon E ; Maison des étudiants	212
3.1.5 Mesure en temps réel de la charge totale du marché METRO	226
3.1.6 Mesure en temps réel de la charge de la résidence PH4	234
3.1.7 Mesure en temps réel de la charge de la résidence PH1	252
3.1.8 Mesure en temps réel de la charge du carrefour d'innovation INGO.....	257
3.2 Simulation du réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS avec MATLAB/SimPowerSystems (SPS)	268
3.2.1 Bloc SimPowerSystems (SPS) pour les câbles.....	270
3.2.2 Bloc SimPowerSystems (SPS) pour les transformateurs.....	272
3.2.3 Bloc SimPowerSystems (SPS) pour les charges.....	274
3.2.4 Schéma de simulation de l'intégralité du réseau électrique de l'ÉTS	276

CHAPITRE 4 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE MESURES EN TEMPS RÉEL ET IMPACT DE L'INTÉGRATION D'UNE STATION DE RECHARGE POUR LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU CAMPUS.....	301
4.1 Analyse et interprétation des mesures en temps réel effectuées aux bornes des charges raccordées au réseau électrique de l'ÉTS	301
4.1.1 Analyse des formes d'ondes des courants et tensions des charges raccordées au réseau électrique de l'ÉTS.....	302
4.1.2 Analyse des profils des puissances des charges raccordées au réseau de l'ÉTS	314
4.1.2.1 Bilan des puissances réactives des charges raccordées au réseau électrique du campus de l'ÉTS	315
4.1.2.2 Bilan des puissances apparentes des charges raccordées au réseau électrique du campus de l'ÉTS	324
4.2 Exemple d'installation d'une station de recharge pour les véhicules électriques sur le réseau électrique du campus de l'ÉTS	337
CONCLUSION.....	347
RECOMMANDATIONS	351
ANNEXE I ESSAIS DE PRODUCTION POUR LES TRANSFORMATEURS T3, T4, T6	355
ANNEXE II AWG CROSS REFERENCE WIRE SINZING CHART.....	361
ANNEXE III SCRIPT DE MATLAB POUR LA SIMULATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU CAMPUS.....	363
BIBLIOGRAPHIE.....	389

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 2.1	Spécifications des plaques signalétiques des transformateurs 25kV/600V	30
Tableau 2.2	Liste des Transformateurs installés dans le pavillon A	34
Tableau 2.3	Liste des Transformateurs CLUMEQ installés dans le pavillon A.....	35
Tableau 2.4	Liste des Transformateurs installés dans le pavillon B.....	35
Tableau 2.5	Liste des Transformateurs installés dans la résidence phase 1	35
Tableau 2.6	Liste des Transformateurs installés dans la résidence phase 2	36
Tableau 2.7	Liste des Transformateurs installés dans la résidence phase 3	36
Tableau 2.8	Liste des Transformateurs installés dans la résidence phase 4	36
Tableau 2.9	Liste des Transformateurs installés dans le marché Metro	37
Tableau 2.10	Liste des Transformateurs installés dans le centre d'innovation INGO.....	37
Tableau 2.11	Liste des Transformateurs installés dans le centre de technologie thermique CTT.....	37
Tableau 2.12	Liste des Transformateurs installés dans le pavillon E; Maison des étudiants	38
Tableau 3.1	Transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le pavillon A.....	60
Tableau 3.2	Transformateurs de puissance apparente nominale $S \geq 100\text{kVA}$ alimentant les CLUMEQ	150
Tableau 3.3	Transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le pavillon B.....	171
Tableau 3.4	Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le pavillon E ; Maison des étudiants.....	212

Tableau 3.5	Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ alimentant le marché Metro	226
Tableau 3.6	Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans la résidence PH4	235
Tableau 3.7	Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans la résidence PH1	253
Tableau 3.8	Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le carrefour d'innovation INGO	258
Tableau 3.9	Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans la résidence PH3	267
Tableau 3.10	Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans la résidence PH2	267
Tableau 3.11	Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le centre de technologie thermique CTT	267
Tableau 4.1	Valeurs cibles des harmoniques des tensions pour les réseaux à moyenne et basse tension.....	303
Tableau 4.2	Limites des taux de courants harmoniques individuels impairs I_n/I_r (%) en conditions générales	306
Tableau 4.3	Limites des taux de courants harmoniques individuels pairs I_n/I_r (%) en conditions générales	306
Tableau 4.4	Bilan des puissances réactives en kVAr pour toutes les charges raccordées au réseau électrique du campus universitaire	316

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 2.1	Diagramme de l'installation électrique du campus universitaire de l'ÉTS niveau 25kV	32
Figure 2.2	Table des valeurs de la conductance et de la perméabilité relative pour les différents matériaux des câbles	42
Figure 2.3	Essais de production pour les transformateurs T3, T4 et T6	47
Figure 3.1	Réseau électrique de l'ÉTS sur l'interface Vista Powerlogic de Schneider Electric	54
Figure 3.2	Analyseur PowerLogic ION 7650 de Schneider Electric utilisé pour les mesures en temps réel.....	56
Figure 3.3	Exemple de mesures réalisées au niveau d'un panneau alimenté par l'un des transformateurs.....	57
Figure 3.4	Interface Management Console	58
Figure 3.5	Pavillons et bâtiments du Campus de l'ETS.....	59
Figure 3.6	Charge alimentée par le transformateur TBR	61
Figure 3.7	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du TBR.....	62
Figure 3.8	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1, V2 au niveau de la charge du Transformateur TBR	63
Figure 3.9	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1, I2 au niveau de la charge du Transformateur TBR.....	63
Figure 3.10	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du Transformateur TBR	64
Figure 3.11	Charge alimentée par le transformateur RC-TR-01	64
Figure 3.12	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (1) de RC-TR-01	66

Figure 3.13	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (3) de RC-TR-01	67
Figure 3.14	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (1) du Transfo RC-TR-01.....	68
Figure 3.15	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (1) du Transfo RC-TR-01.....	68
Figure 3.16	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (1) du Transfo RC-TR-01.....	69
Figure 3.17	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (3) du Transfo RC-TR-01.....	69
Figure 3.18	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau (1) du Transfo RC-TR-01	70
Figure 3.19	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau (3) du Transfo RC-TR-01	70
Figure 3.20	Charge alimentée par le transformateur RC-TR-02.....	71
Figure 3.21	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (4) de RC-TR-02.....	72
Figure 3.22	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (4) du Transfo RC-TR-02.....	73
Figure 3.23	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (4) du Transfo RC-TR-02.....	73
Figure 3.24	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau (4) du Transfo RC-TR-02	74
Figure 3.25	Charge alimentée par le transformateur TPPHR	74
Figure 3.26	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPHR de TPPHR	76

Figure 3.27	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPHR du Transfo TPPHR	77
Figure 3.28	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPHR du Transfo TPPHR	77
Figure 3.29	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau PPHR connecté au Transfo TPPHR	78
Figure 3.30	Charge alimentée par le transformateur TPP1R	78
Figure 3.31	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau PPHR connecté au Transfo TPPHR	79
Figure 3.32	Charge alimentée par le transformateur TPPA1	81
Figure 3.33	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPHR de TPPHR	82
Figure 3.34	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPA1 du Transfo TPPA1	83
Figure 3.35	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPA1 du Transfo TPPA1	83
Figure 3.36	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du PPA1 du Transfo TPPA1	84
Figure 3.37	Transformateur T2-A-1362 et la charge qu'il alimente	85
Figure 3.38	Charge alimentée par le transformateur TBI	85
Figure 3.39	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau BI alimenté par TBI	87
Figure 3.40	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 au niveau de la charge du panneau BI du Transfo TBI	88
Figure 3.41	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 au niveau de la charge du panneau BI du Transfo TBI	88

Figure 3.42	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau BI alimenté par le Transfo TBI	89
Figure 3.43	panneaux alimentés par le transformateur 01-TR-02.....	90
Figure 3.44	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (305) de 01-TR-02	92
Figure 3.45	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (306) de 01-TR-02	93
Figure 3.46	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des panneaux (305) et (306)-Transfo 01-TR-02.....	94
Figure 3.47	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des panneau (305) et (306) du Transfo 01-TR-02.....	95
Figure 3.48	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge des panneaux (305) et (306) alimentés par le Transfo 01-TR-02	96
Figure 3.49	Charge alimentée par le transformateur TPPC1	97
Figure 3.50	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPC1 de TPPC1	98
Figure 3.51	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPC1 du Transfo TPPC1.....	99
Figure 3.52	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPC1 du Transfo TPPC1.....	99
Figure 3.53	Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau (305) du Transfo 01-TR-02.....	100
Figure 3.54	Installation des deux Transformateurs dans A-2536.1 et leurs charges	101

Figure 3.55	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du transfo T1-A-2536.1.....	103
Figure 3.56	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du transfo T2-A-2536.1.....	104
Figure 3.57	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des transfos T1-A-2536.1 et T2-A-2536.1.....	105
Figure 3.58	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des transfos T1-A-2536.1 et T2-A-2536.1.....	106
Figure 3.59	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge des Transfos T1-A-2536.1 et T2-A-2536.1	107
Figure 3.60	Plaques signalétiques du Transfo T3-A-2762 et des deux moteurs M1 et M2.....	108
Figure 3.61	Charge alimentée par le transformateur TPPD2	109
Figure 3.62	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du transfo TPPD2.....	111
Figure 3.63	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du transfo TPPD2	112
Figure 3.64	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du transfo TPPD2	112
Figure 3.65	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du Transfos TPPD2	113
Figure 3.66	Refroidisseur alimenté par le transformateur T1-A-3502.....	114
Figure 3.67	Charge alimentée par le transformateur T2-A-3502.....	114
Figure 3.68	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge connectée au transformateur T2-A-3502	116

Figure 3.69	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du transfo T2-A-3502	117
Figure 3.70	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du transfo T2-A-3502	117
Figure 3.71	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du Transfos T2-A-3502	118
Figure 3.72	Charge totale alimentée par le transformateur 03-TR-01	119
Figure 3.73	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (303) connecté au 03-TR-01	121
Figure 3.74	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (304) connecté au 03-TR-01	122
Figure 3.75	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des panneaux (303) et (304) connectés au transfo 03-TR-01	123
Figure 3.76	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des panneaux (303) et (304) connectés au transfo 03-TR-01	124
Figure 3.77	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (303) connecté au transfo 03-TR-01	125
Figure 3.78	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (304) connecté au transfo 03-TR-01	126
Figure 3.79	Charge totale alimentée par le transformateur 03-TR-02	128
Figure 3.80	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (307) connecté au 03-TR-02	129
Figure 3.81	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (308) connecté au 03-TR-02	130

Figure 3.82	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des panneaux (307) et (308) connectés au transfo 03-TR-02	131
Figure 3.83	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des panneaux (307) et (308) connectés au transfo 03-TR-02	132
Figure 3.84	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge des panneaux (307) et (308) connectés au transfo 03-TR-02	133
Figure 3.85	Charge totale connectée au transformateur T2-A3548	134
Figure 3.86	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (35) connecté au T2-A-3548	135
Figure 3.87	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (36) connecté au T2-A-3548	136
Figure 3.88	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des panneaux (36) et (37) connectés au transfo T2-A-3548.....	137
Figure 3.89	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des panneaux (36) et (37) connectés au transfo T2-A-3548	138
Figure 3.90	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge des panneaux (35) et (36) connectés au transfo T2-A-3548.....	139
Figure 3.91	Charge alimentée par le transformateur TPPC3	141
Figure 3.92	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPC3 connecté au TPPC3	142
Figure 3.93	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPC3 connecté au transfo TPPC3	143

Figure 3.94	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPC3 connecté au transfo TPPC3	143
Figure 3.95	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PPC3 connecté au transfo TPPC3	144
Figure 3.96	Charge alimentée par le transformateur TPPA3	145
Figure 3.97	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPA3 connecté au TPPA3	146
Figure 3.98	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPA3 connecté au transfo TPPA3	147
Figure 3.99	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPA3 connecté au transfo TPPA3	147
Figure 3.100	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PPA3 connecté au transfo TPPA3	148
Figure 3.101	Charge alimentée par le transformateur TRANSFO 04-03	150
Figure 3.102	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (400)-TRANSFO 04-03	151
Figure 3.103	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (400)-TRANSFO 04-03	152
Figure 3.104	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (400)-TRANSFO 04-03	152
Figure 3.105	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (400) connecté au TRANSFO 04-03	153
Figure 3.106	Charge alimentée par le transformateur TRANSFO 04-04	154
Figure 3.107	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (401)-TRANSFO 04-04	155

Figure 3.108	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (401)-TRANSFO 04-04156
Figure 3.109	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (401)-TRANSFO 04-04156
Figure 3.110	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (401) connecté au TRANSFO 04-04.....157
Figure 3.111	Charge alimentée par le transformateur TRANSFO 04-05158
Figure 3.112	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (402) connecté au TRANSFO 04-05159
Figure 3.113	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (402)-TRANSFO 04-05160
Figure 3.114	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (402)-TRANSFO 04-05160
Figure 3.115	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (402) connecté au TRANSFO 04-05.....161
Figure 3.116	Charge alimentée par le transformateur TRANSFO 04-06162
Figure 3.117	Charge alimentée par le transformateur TRANSFO 04-07162
Figure 3.118	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (404)- TRANSFO 04-07163
Figure 3.119	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (404)-TRANSFO 04-07164
Figure 3.120	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (404)-TRANSFO 04-07164
Figure 3.121	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (404) connecté au TRANSFO 04-07.....165
Figure 3.122	Charge alimentée par le transformateur TRANSFO 04-08166

Figure 3.123	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (405)-TRANSFO 04-08	167
Figure 3.124	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (405)-TRANSFO 04-08	168
Figure 3.125	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (405)-TRANSFO 04-08	168
Figure 3.126	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (405) connecté au TRANSFO 04-08.....	169
Figure 3.127	Serveurs CLUMEQ alimentés par les transfos CLUMEQ	170
Figure 3.128	Charge alimentée par le transformateur RC-TR-01	171
Figure 3.129	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau RC-D2-01-TRANSFO RC-TR-01	173
Figure 3.130	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau RC-D2-01 connecté au transformateur RC-TR-01	174
Figure 3.131	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau RC-D2-01 connecté au transformateur RC-TR-01	174
Figure 3.132	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau RC-D2-01-TRANSFO RC-TR-01	175
Figure 3.133	Charge alimentée par le transformateur 01-TR-01	176
Figure 3.134	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (12)-TRANSFO 01-TR-01.....	177
Figure 3.135	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (13)-TRANSFO 01-TR-01.....	178
Figure 3.136	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (14)-TRANSFO 01-TR-01.....	179

Figure 3.137	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de l'auget 01-AG-03-TRANSFO 01-TR-01.....	180
Figure 3.138	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (12)-TRANSFO 01-TR-01.....	181
Figure 3.139	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (12)-TRANSFO 01-TR-01	181
Figure 3.140	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (13)-TRANSFO 01-TR-01.....	182
Figure 3.141	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (13)-TRANSFO 01-TR-01	182
Figure 3.142	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (14)-TRANSFO 01-TR-01.....	183
Figure 3.143	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (14)-TRANSFO 01-TR-01	183
Figure 3.144	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge de l'auget 01-AG-03-TRANSFO 01-TR-01	184
Figure 3.145	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge de l'auget 01-AG-03-TRANSFO 01-TR-01	184
Figure 3.146	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (12)-TRANSFO 01-TR-01	185
Figure 3.147	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (13)-TRANSFO 01-TR-01	186
Figure 3.148	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (14)-TRANSFO 01-TR-01	187
Figure 3.149	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge de l'auget 01-AG-03-TRANSFO 01-TR-01.....	188

Figure 3.150	Charge alimentée par le transformateur 02-TR-01	190
Figure 3.151	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (21)-TRANSFO 02-TR-01.....	191
Figure 3.152	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (22)-TRANSFO 02-TR-01.....	192
Figure 3.153	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (26)-TRANSFO 02-TR-01.....	193
Figure 3.154	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de l'auget 02-AG-03-TRANSFO 02-TR-01.....	194
Figure 3.155	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (21)-TRANSFO 02-TR-01.....	195
Figure 3.156	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (21)-TRANSFO 02-TR-01	195
Figure 3.157	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (22)-TRANSFO 02-TR-01.....	196
Figure 3.158	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (22)-TRANSFO 02-TR-01	196
Figure 3.159	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (26)-TRANSFO 02-TR-01.....	197
Figure 3.160	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (26)-TRANSFO 02-TR-01	197
Figure 3.161	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge de l'auget 02-AG-03-TRANSFO 02-TR-01	198

Figure 3.162	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge de l'auget 02-AG-03-TRANSFO 02-TR-01	198
Figure 3.163	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (21)-TRANSFO 02-TR-01	199
Figure 3.164	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (22)-TRANSFO 02-TR-01	199
Figure 3.165	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (26)-TRANSFO 02-TR-01	200
Figure 3.166	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge de l'auget 02-AG-03-TRANSFO 02-TR-01.....	200
Figure 3.167	Charge alimentée par le transformateur 03-TR-01	201
Figure 3.168	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (31)-TRANSFO 03-TR-01.....	203
Figure 3.169	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (32)-TRANSFO 03-TR-01.....	204
Figure 3.170	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (33)-TRANSFO 03-TR-01.....	205
Figure 3.171	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (31)-TRANSFO 03-TR-01.....	206
Figure 3.172	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (31)-TRANSFO 03-TR-01	206
Figure 3.173	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (32)-TRANSFO 03-TR-01.....	207
Figure 3.174	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (32)-TRANSFO 03-TR-01	207

Figure 3.175	Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (33)-TRANSFO 03-TR-01.....	208
Figure 3.176	Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (33)-TRANSFO 03-TR-01	208
Figure 3.177	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (31)-TRANSFO 03-TR-01	209
Figure 3.178	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (32)-TRANSFO 03-TR-01	209
Figure 3.179	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (33)-TRANSFO 03-TR-01	210
Figure 3.180	Charge alimentée par le transformateur 04-TR-02	211
Figure 3.181	Charge alimentée par le transformateur TR-SS2-2.....	213
Figure 3.182	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PR-SS2-1-TRANSFO TR-SS2-2	214
Figure 3.183	Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PR-SS2-1 connecté au transformateur TR-SS2-2.....	215
Figure 3.184	Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PR-SS2-1 connecté au transformateur TR-SS2-2.....	215
Figure 3.185	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PR-SS2-1-TRANSFO TR-SS2-2	216
Figure 3.186	Charge alimentée par le transformateur TRANSFO CHILLER 2.....	217
Figure 3.187	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du refroidisseur CHILLER 802-TRANSFO CHILLER 2	218
Figure 3.188	Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du refroidisseur CHILLER 802-TRANSFO CHILLER 2	219

Figure 3.189	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du refroidisseur CHILLER 802-TRANSFO CHILLER 2	219
Figure 3.190	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du refroidisseur CHILLER 802-TRANSFO CHILLER 2.....	220
Figure 3.191	Charge alimentée par le transformateur TRANSFO CHILLER 1	221
Figure 3.192	Charge alimentée par le transformateur TR-A-1	222
Figure 3.193	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PR-A-1 (1) -TRANSFO TR-A-1.....	223
Figure 3.194	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PR-A-1 (1) connecté au transformateur TR-A-1	224
Figure 3.195	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PR-A-1 (1) connecté au transformateur TR-A-1	224
Figure 3.196	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PR-A-1 (1)-TRANSFO TR-A-1.....	225
Figure 3.197	Charge alimentée par le transformateur MA-TR-0101.....	227
Figure 3.198	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau MA-D2-0102-TRANSFO MA-TR-0101	228
Figure 3.199	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau MA-D2-0102 connecté au transfo MA-TR-0101	229
Figure 3.200	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau MA-D2-0102 connecté au transfo MA-TR-0101	229
Figure 3.201	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau MA-D2-0102-TRANSFO MA-TR-0101	230
Figure 3.202	Charge alimentée par le transformateur MA-TR-0102.....	231

Figure 3.203	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau MA-D2-0101-TRANSFO MA-TR-0102.....	232
Figure 3.204	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau MA-D2-0101 connecté au TRANSFO MA-TR-0102	233
Figure 3.205	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau MA-D2-0101 connecté au TRANSFO MA-TR-0102	233
Figure 3.206	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau MA-D2-0101-TRANSFO MA-TR-0102	234
Figure 3.207	Charge alimentée par le transformateur TL-RA	235
Figure 3.208	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PDS-RA-TRANSFO TL-RA.....	237
Figure 3.209	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PDS-RA-TRANSFO TL-RA.....	238
Figure 3.210	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PDS-RA-TRANSFO TL-RA.....	238
Figure 3.211	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PDS-RA-TRANSFO TL-RA	239
Figure 3.212	Charge alimentée par le transformateur TL-RB	240
Figure 3.213	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PDS-RB-TRANSFO TL-RB.....	242
Figure 3.214	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PDS-RB-TRANSFO TL-RB	243
Figure 3.215	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PDS-RB-TRANSFO TL-RB	243

Figure 3.216	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PDS-RB-TRANSFO TL-RB.....	244
Figure 3.217	Charge alimentée par le transformateur TL-8A.....	245
Figure 3.218	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PDS-8A-TRANSFO TL-8A.....	246
Figure 3.219	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PDS-8A-TRANSFO TL-8A.....	247
Figure 3.220	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PDS-8A-TRANSFO TL-8A.....	247
Figure 3.221	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PDS-8A-TRANSFO TL-8A.....	248
Figure 3.222	Charge alimentée par le transformateur TL-8B.....	248
Figure 3.223	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PDS-8B-TRANSFO TL-8B.....	250
Figure 3.224	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PDS-8B-TRANSFO TL-8B.....	251
Figure 3.225	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PDS-8B-TRANSFO TL-8B.....	251
Figure 3.226	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PDS-8B-TRANSFO TL-8B.....	252
Figure 3.227	Charge alimentée par le transformateur TA-BUANDERIE.....	253
Figure 3.228	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau P-A connecté à TA-BUANDERIE.....	255

Figure 3.229	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de de la charge du panneau P-A connecté au transfo TA-BUANDERIE.....	256
Figure 3.230	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de de la charge du panneau P-A connecté au transfo TA-BUANDERIE.....	256
Figure 3.231	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau du panneau P-A connecté à TA-BUANDERIE.....	257
Figure 3.232	Charge alimentée par le transformateur 04-TR-401	258
Figure 3.233	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau 04-E2-401 (40)-TRANSFO 04-TR-401.....	260
Figure 3.234	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau 04-E2-401 (40) connecté au TRANSFO 04-TR-401.....	261
Figure 3.235	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau 04-E2-401 (40) connecté au TRANSFO 04-TR-401.....	261
Figure 3.236	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau 04-E2-401 (40)-TRANSFO 04-TR-401.....	262
Figure 3.237	Charge alimentée par le transformateur 07-TR-401	262
Figure 3.238	Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau 07-E2-401 (70)-TRANSFO 07-TR-401.....	264
Figure 3.239	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau 07-E2-401 (70) connecté au transfo 07-TR-401.....	265
Figure 3.240	Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau 07-E2-401 (70) connecté au transfo 07-TR-401.....	265
Figure 3.241	Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau 07-E2-401 (70)-TRANSFO 07-TR-401.....	266

Figure 3.242	Bloc de SimPowerSystems (SPS) modélisant les câbles.....	271
Figure 3.243	Bloc de SimPowerSystems (SPS) modélisant les transformateurs.....	273
Figure 3.244	Bloc de SimPowerSystems (SPS) modélisant la charge.....	274
Figure 3.245	Diagramme de simulation du réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS	276
Figure 3.246	Diagramme de simulation du réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS	278
Figure 3.247	Diagramme de simulation du réseau électrique du campus avant l'intégration d'une charge non linéaire	280
Figure 3.248	Diagramme de simulation du réseau électrique du campus avec l'intégration d'une charge non linéaire	281
Figure 3.249	Formes d'onde des courants de charge avant et après introduction des harmoniques des courants.....	282
Figure 3.250	Taux de distorsion harmonique THD des courants de charge avant l'introduction des harmoniques de courants	284
Figure 3.251	Taux de distorsion harmonique THD des courants de charge après l'introduction des harmoniques de courants	285
Figure 3.252	Formes d'onde des tensions de charge avant et après introduction des harmoniques des courants.....	287
Figure 3.253	Taux de distorsion harmonique THD des tensions de charge avant l'introduction des harmoniques de courants	288
Figure 3.254	Taux de distorsion harmonique THD des tensions de charge après l'introduction des harmoniques de courants	289
Figure 3.255	Formes d'onde des tensions au niveau du primaire du transformateur côté 600V avant et après introduction des harmoniques des courants	291
Figure 3.256	Taux de distorsion harmonique THD au niveau du primaire du transformateur côté 600V avant l'introduction des harmoniques de courants	292

Figure 3.257	Taux de distorsion harmonique THD au niveau du primaire du transformateur côté 600V après l'introduction des harmoniques de courants	293
Figure 3.258	Formes d'onde des tensions au niveau de la source, du côté 25kV avant et après introduction des harmoniques des courants	295
Figure 3.259	Taux de distorsion harmonique THD au niveau de la source, côté 25kV avant l'introduction des harmoniques de courants.....	296
Figure 3.260	Taux de distorsion harmonique THD au niveau de la source, côté 25kV après l'introduction des harmoniques de courants	297
Figure 4.1	Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés aux rez-de-chaussée et 1 ^{er} étage du pavillon A	325
Figure 4.2	Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux bornes des transformateurs installés au 2 ^{ème} et 3 ^{ème} étage du pavillon A	326
Figure 4.3	Diagramme des bilans des puissances apparentes des CLUMEQ raccordés aux transformateurs installés au 4 ^{ème} étage du pavillon A.....	327
Figure 4.4	Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans le pavillon B	328
Figure 4.5	Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans le pavillon E.....	329
Figure 4.6	Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés au sous-sol de la résidence PH3 pour le marché Metro.....	330
Figure 4.7	Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans la résidence PH4	331
Figure 4.8	Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans la résidence PH1	332
Figure 4.9	Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans INGO	333
Figure 4.10	Profil de charge pour les deux véhicules électriques de type BMW i3 et Nissan Leaf	340

Figure 4.11	Schéma de simulation du profil de charge construit des véhicules électriques Nissan Leaf et BMW i3	341
Figure 4.12	Schéma SimPowerSystems (SPS) de l'introduction du profil de charge des véhicules électriques Nissan Leaf et BMW i3 aux bornes du transfo TPP1R	342
Figure 4.13	Schéma SimPowerSystems (SPS) de l'introduction du profil de charge des véhicules électriques Nissan Leaf et BMW i3 aux bornes du transformateur TR-SS2-2	343
Figure 4.14	Schéma de simulation du Bilan de puissances de la totalité de charge aux bornes des transformateurs TPP1R et TR-SS2-2 suite au raccordement du profil de charge des véhicules électriques.....	344

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

PEHVs	Plug-in electric hybrid vehicles
PEVs	Plug-in electric vehicles
V2V	Vehicle to vehicle
V2G	Vehicle to grid
GVs	Gridable vehicles
PV	Panneaux photovoltaïques
PSO	Particle swarm optimization
SOC	State of charge
EVs	Electric vehicles
STATCOM	Static compensator
GSC	Grid side converter
RTDS	Real time digital simulator
TRANSFO	Transformateur
PRIM	Primaire
SEC	Secondaire
CTT	Centre de technologie thermique
INGO	Carrefour d'innovation
ÉTS	École de technologie supérieure
PH1	Phase 1
PH2	Phase 2

XL

PH3 Phase 3

PH4 Phase 4

MLI Modulation en largeur d'impulsion

RT-SLM Real-time smart load management

THD Taux de distorsion harmonique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

<i>kW</i>	Kilowatt
<i>MW</i>	Megawatt
<i>V</i>	Volts
<i>kV</i>	Kilovolt
<i>kVA</i>	Kilovolt Ampère
<i>kVAr</i>	Kilovolt Ampère Reactive
<i>H</i>	Henry
<i>nH</i>	Nano Henry
μH	micro Henry
Ω	Ohm
Ωm	Ohm mètre
$m\Omega$	Milliohm
<i>s</i>	Seconde
<i>min</i>	Minutes
<i>AWG</i>	American Wire Gauge
<i>MCM</i>	Thousands of Circular Mills
<i>kcMil</i>	Thousands of Circular Mills
<i>m</i>	Mètre
m^2	Millimètre
mm^2	Millimètre au carré

INTRODUCTION

La qualité de l'onde a fait l'objet de plusieurs études vu son impact majeur sur la performance du réseau électrique. En effet, la qualité de l'onde fût un sujet problématique étant donné que tout en assurant une meilleure qualité de l'onde au sein d'une installation électrique, nous assurons ainsi un meilleur rendement énergétique de cette installation tel que c'était expliqué par Hydro-Québec. (2014).

Afin d'améliorer la qualité de l'onde, plusieurs facteurs sont à tenir en compte, parmi ces facteurs il est possible de mentionner les formes d'onde des tensions et des courants tel qu'il faut s'assurer que ces dernières se rapprochent le plus possible des formes d'onde parfaitement sinusoïdales. À cet effet, il faut essayer de protéger les tensions et courants de contre toutes sortes de perturbations électriques, ce qui a été expliqué par N. H. MENDALEK. (2003) comme le déséquilibre rencontré au sein d'un système triphasé, le taux de distorsion harmonique élevé des courants et tensions ce qui risque d'engendrer un faible facteur de puissance.

En plus des harmoniques et du déséquilibre, il faut mentionner autres perturbations qui peuvent affecter les tensions et courants circulant dans le réseau électrique comme le courant réactif du côté des courants ainsi que les surtensions, les creux et fluctuations de tension du côté des tensions.

Le besoin d'avoir recourt à des moyens de mitigations pour ces formes de perturbations qui peuvent affecter une installation électrique donnée peut s'expliquer par le fait que ce genre de perturbations est susceptible d'entraîner, comme l'a indiqué Philippe Ferrapacci. (2001) dans un rapport technique publié par Schneider Electric, la surcharge d'une installation ce qui entrainera par la suite un vieillissement prématuré des équipements qui y sont raccordés.

Ce vieillissement peut engendrer encore la défaillance et dysfonctionnement des équipements ce qui risque de résulter en leur surdimensionnement et donc augmentation des pertes au sein de cette installation électrique. De plus, les pertes résultantes pourraient avoir comme conséquences une augmentation des coûts liés aux factures d'électricité ce qui est loin d'être bénéfique pour l'industrie et ce qui affecte aussi la qualité de service fourni par ces industriels étant donné le risque de rupture de service omniprésent à cause de ces perturbations de la qualité de l'onde.

D'où le besoin de l'optimisation continue de la qualité de l'onde en effectuant une maintenance continue des équipements et améliorant ainsi le fonctionnement et le rendement des installations électriques. Cependant, pour pouvoir assurer cette optimisation de la qualité de l'onde, il faudrait tout d'abord investiguer et mesurer assez fréquemment la qualité de l'énergie produite et circulant au sein du réseau électrique concerné.

Ainsi dans ce contexte, le travail réalisé dans ce mémoire présentera des mesures effectuées en temps réel au sein d'une installation électrique d'un campus universitaire, qui est celui de l'ÉTS, et qui permettront de mettre en relief les différentes caractéristiques de la qualité de l'onde circulant dans l'installation électrique en question. Cependant, avant de procéder à ces mesures, il a fallu passer par certaines étapes énumérées comme suit :

Dans le premier chapitre, différents aspects de perturbations qui s'avèrent en mesure de nuire à la qualité de l'onde ont été décelés, et ce tout en se référant à plusieurs études réalisées auparavant dans ce contexte. Ensuite, plusieurs moyens de mitigations ont été mentionnés pour remédier à ces formes de perturbations comme les moyens de compensation des harmoniques de puissance ainsi que la puissance réactive. Par la suite, une deuxième partie dans le premier chapitre a été consacrée pour étudier l'impact de l'introduction de quelques exemples de station de recharge pour les véhicules électriques sur le réseau électrique, tout en se basant pareillement sur des travaux et recherches réalisés au préalable.

Ensuite, le deuxième chapitre s'intéressera à effectuer l'étude détaillée de l'installation électrique de tout pavillon ou bâtiment constituant le campus universitaire de l'ÉTS. Pour ce faire, la première partie du deuxième chapitre a été élaborée afin de présenter les données obtenues suite à une visite effectuée en pratique des différentes artères dans le but d'identifier et faire l'inventaire des équipements électriques installés sur place au sein du campus tout en se concentrant essentiellement sur les transformateurs et les différentes charges qu'alimentent ces derniers dont la puissance apparente nominale dépasse les 100kVA. De plus, la dernière partie de ce chapitre traitera le calcul des impédances des câbles ainsi que celles des transformateurs que comporte l'installation électrique de l'ÉTS.

Quant au troisième chapitre, le premier paragraphe de ce dernier présente les résultats de mesures réalisées en temps réel tout en utilisant une interface appelée Vista Powerlogic qui est un logiciel de mesure en temps réel élaboré par la compagnie Schneider Electric. En effet, ces mesures ont été effectuées dans les différents pavillons du campus universitaire et ce au niveau de toute charge alimentée par tout transformateur de grande puissance. Cela a permis ainsi d'évaluer en temps réel les différents aspects et caractéristiques de la qualité de l'onde produite et circulant dans le réseau électrique de l'ÉTS. Pour terminer avec le troisième chapitre, une simulation de l'intégralité de l'installation électrique de l'ÉTS a été réalisée tout en se servant du logiciel de simulation MATLAB/ SimPowerSystems (SPS) et tout en introduisant les résultats obtenus en temps réel avec le logiciel Vista Powerlogic dans le premier paragraphe.

Pour finir, un quatrième chapitre a été consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats de mesures en temps réel réalisées et présentés précédemment dans le troisième chapitre. Il était ainsi possible de mettre en évidence dans un premier temps les différents problèmes découverts et affectant la qualité de l'onde au sein du réseau électrique du campus universitaire. De plus, dans un deuxième temps, cela a permis d'avoir une idée bien précise et détaillée vis-à-vis du dimensionnement des transformateurs puisque nous nous intéressons dans la suite du quatrième chapitre à effectuer le choix optimal parmi ces transformateurs

afin d'installer un exemple de charge de niveau trois constituée d'une station de recharge pour les véhicules électriques.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Vu le développement massif de l'électronique de puissance dans l'industrie, des harmoniques de puissance sont de plus en plus générés notamment par les charges non linéaires ce qui entraîne par la suite la dégradation de la qualité de la puissance ainsi que la fiabilité du système de puissance ; d'où le besoin de la compensation des harmoniques de puissance.

En plus des harmoniques, le réseau électrique est face à un autre enjeu qui peut nuire pareillement à la performance du réseau tel qu'il s'agit de la circulation du courant réactif, autrement dit de la puissance réactive.

Ainsi, il est important de pouvoir remédier aux problèmes précédemment évoqués, ce que traitera le paragraphe qui suit.

1.1 Compensation des harmoniques et de la puissance réactive dans le réseau électrique

Un système de stockage d'énergie à base de batteries a été proposé par Y. S. Shiao et al. (1992) tel qu'il consiste à intégrer un onduleur utilisant la technique de commande MLI. Ce système jouera le rôle d'un compensateur du courant harmonique et réactif tout en adoptant une stratégie de contrôle de l'onduleur qui est basée sur un algorithme de calcul du théorème de puissance instantanée dont le principe est d'une part maintenir le facteur de puissance unitaire et d'autre part de supprimer les courants harmoniques générés par les charges non linéaires.

Traditionnellement, pour améliorer le facteur de puissance des lignes d'alimentation, un filtre passif ou un banc de condensateurs sont souvent utilisés. Cependant, les composants de ces

derniers ne sont pas adéquats pour des applications en temps réel étant donné qu'ils sont complexes, non linéaires et opèrent dans un intervalle de fréquences assez limité.

D'un autre côté, un filtre actif sans les composants de stockage LC a tendance à fournir un courant réactif et harmonique aux charges non linéaires. Il est possible d'effectuer la conception et l'implémentation théorique du filtre actif. En effet, le développement de ce dernier dans la pratique est encore limité à quelques prototypes du laboratoire et à une production assez réduite.

Pour le contrôle du système proposé, deux méthodes de contrôle sont étudiées dans la simulation ; le contrôle Hystérésis et le contrôle Rampe. Quant au compensateur proposé dans cet article est considéré comme une source de courant, il est ensuite ajusté pour compenser les courants harmoniques et réactifs existants dans les charges non linéaires. Cet ajustement consiste à trouver la bonne stratégie de contrôle et pour ce faire, un schéma de contrôle est proposé. Il comporte un circuit analogique pour le calcul des courants harmoniques et réactifs, un paramètre de contrôle du circuit de séparation, un contrôle de la tension du bus DC aux bornes du banc de condensateurs et le contrôle du courant à la sortie de l'onduleur.

Pour la conception du circuit analogique, un algorithme de calcul du théorème de la puissance instantanée est utilisé. Ce circuit est intégré dans le système de contrôle pour calculer les composantes instantanées des puissances active et réactive dans les coordonnées de Park de la charge non linéaire. Il faut rappeler que le but du compensateur conçu est de s'assurer que d'une part le filtre actif fournit des courants harmoniques et réactifs à la charge non linéaire et que d'autre part la source d'alimentation ne fournit que la puissance active.

Quant au paramètre de contrôle du circuit de séparation, il est représenté par un filtre passe haut dont la fonction de transfert est exprimée en fonction de celle d'un filtre passe bas Butterworth. Ce dernier est réellement utilisé comme un circuit de séparation.

Par la suite, Y. S. Shiao et al. (1992) expliquent les techniques de contrôle utilisées pour le contrôle du courant à la sortie de l'onduleur. En effet, il s'agit du contrôle hystérésis et Rampe. Pour la technique d'hystérésis, un courant de référence est appliqué à la sortie de l'onduleur dans le but que le courant réel obtenu à la sortie de l'onduleur puisse le suivre. Cependant, pour ce type de technique de contrôle la fréquence de commutation est si variable qu'il est compliqué de bien définir les courants harmoniques et réactifs de sortie. D'autre part, la fréquence de commutation utilisée dans le cas de la technique la rampe est celle d'un signal triangulaire autrement dit fixe ce qui permet ainsi d'avoir des harmoniques bien définis et d'ajuster le courant à la sortie de l'onduleur. D'où le choix du contrôle de la rampe pour la suite du travail.

Le contrôle de la tension du bus DC est aussi étudié dans cet article. Le but est tout simplement de maintenir la tension du bus continu DC constante et ce tout utilisant un banc de condensateurs afin d'assurer la compensation de la chute de tension suite aux pertes et d'éliminer les fluctuations de tension. C'est le rôle du bus DC en plus de la compensation des courants harmoniques et réactifs.

Pour mieux analyser le schéma de contrôle proposé, deux cas sont étudiés; le premier consiste à connecter le point neutre de la charge au point milieu du banc de condensateurs DC et le deuxième cas s'agit de tout simplement ne pas effectuer cette connexion.

Après avoir étudié les deux cas, le deuxième est choisi pour l'adopter dans la simulation vue qu'il est plus général. Arrivant à la simulation et en choisissant le deuxième cas, les deux stratégies de contrôle hystérésis et la rampe sont implémentées et comparées en simulant une charge triphasée non linéaire. Les résultats de la simulation montrent que l'erreur obtenue dans le cas du contrôle hystérésis suite à la comparaison du courant à la sortie de l'onduleur et le courant de référence du signal de contrôle appliqué est beaucoup plus élevée que celle obtenue dans le cas du contrôle la rampe. Cependant, comme c'était mentionné précédemment, puisqu'il est préférable d'opérer avec le contrôle la rampe où la fréquence est

non fluctuante, il est possible de diminuer l'erreur obtenue tout en ajustant sur le gain du contrôleur ou en intégrant un compensateur. Les résultats obtenus suite à cette diminution de l'erreur montrent que cette dernière peut même être nulle avec l'intégration du compensateur. Le système de compensation des courants harmoniques et réactif conçu par Y. S. Shiao et al. (1992) est par la suite implémenté dans la pratique. Ce type de compensation dépend de l'ordre, de l'amplitude et de la phase du courant harmonique à supprimer.

Le bloc implémenté est constitué de composants analogiques pour effectuer le calcul instantané de la puissance des signaux de référence et de contrôle afin d'assurer la réception de la capacité du contrôle instantanée. Il comprend aussi des transistors de puissance pour s'en servir comme des éléments de commutation de l'onduleur à une fréquence de commutation bien définie où les pertes de commutations sont réduites. Une impédance à base de capacitance et d'inductance bien définies est aussi ajoutée. De plus, une lampe est utilisée comme charge non linéaire.

Les résultats expérimentaux des courants harmoniques et réactifs après compensation ne sont pas conformes aux résultats de la simulation. En effet, cette différence, comme c'était mentionné dans l'article, est due d'une part à la limitation imposée sur la fréquence de commutation pour qu'elle soit plus petite que celle des harmoniques ce qui entraîne par la suite une compensation assez médiocre de la part du contrôleur et d'autre part à la limitation du laboratoire vis-à-vis de la procuration de la bonne qualité des éléments de commutation autrement dit les thyristors.

Les résultats expérimentaux montrent aussi que les courants et tensions de la source sont en phase suite à la compensation des courants harmoniques et réactifs effectuée par le système de stockage d'énergie à base de batteries proposé. De plus, les harmoniques à basse fréquence sont éliminés ce qui n'est hélas pas les cas pour celle à haute fréquence. Cela peut être arrangé suite à l'utilisation des éléments de commutation à haute vitesse et suite à

l'augmentation de la fréquence de commutation afin d'atteindre les harmoniques à ordre élevé.

En conclusion, le système de compensation des courants harmoniques et réactifs proposé par Y. S. Shiao et al. (1992) parvient à ajuster les courants et tensions, améliorer le facteur de puissance et éliminer les harmoniques. Donc le système de contrôle de l'onduleur ainsi proposé est performant et permet à l'onduleur de se comporter comme un compensateur de courants harmoniques et réactifs. La seule amélioration qui peut être recommandée est au niveau de la fabrication du circuit et de la qualité des composants de commutations.

Quant au système de stockage d'énergie à base de batteries, il fonctionne quand la demande journalière en énergie est en hausse, et ce pour fournir de la puissance active pour satisfaire le besoin journalier en énergie et s'arrête pendant les creux de consommation. Ainsi, tout au long de ce creux de consommation, le système de stockage fournit du courant réactif et harmonique de compensation.

Dans un deuxième temps, B. Singh et al. (1998) s'intéressent d'une part à la compensation de la puissance réactive et d'autre part à équilibrer la charge. Pour ce faire, une méthode est proposée et qui peut être utilisée dans un système de distribution électrique triphasé à quatre fils. Pour réaliser ce genre de compensation, un onduleur MLI à base d'IGBT avec un banc de condensateur est proposé comme un compensateur. Pour que ce dernier puisse effectuer une compensation optimale, il est important d'étudier la configuration, le schéma de contrôle adopté et le modèle mathématique du système du compensateur.

Ainsi, l'étude est entamée par l'illustration des composants du bloc du compensateur qui sont une charge triphasée, à quatre fils et déséquilibrée avec un facteur de puissance inductif. Il a été mentionné par B. Singh et al. (1998) que cette charge peut être monophasée, biphasée ou triphasée, équilibrée ou déséquilibrée et avec un facteur de puissance inductif, capacitif ou unitaire.

En plus de la charge, le système du compensateur comprend un onduleur à trois ponts monophasés à base d'IGBT avec un bus dc commun ayant un condensateur pour le stockage d'énergie, ce qui permet de contrôler indépendamment les trois phases et assurer un chemin de retour à travers le neutre. Un contrôle du courant MLI est aussi proposé; il s'agit du contrôle hystérésis qui permet d'avoir une réponse rapide du compensateur.

Cette loi d'hystérésis est utilisée sur les erreurs qui résultent des courants triphasés de références du compensateur et des courants triphasés détectés par le compensateur. Ainsi, des signaux de commutations sont générés au niveau des IGBT du compensateur. Il faut mentionner que le calcul des courants de références du compensateur a été fait en faisant la différence entre les courants de références de la source AC triphasée et les courants de la charge. Avec ce type de contrôle du compensateur, ce dernier satisfait le besoin en puissance réactive de la charge, parvient à équilibrer les courants de la charge pour enfin obtenir des courants de source triphasés équilibrés avec un facteur de puissance unitaire.

L'étude se poursuit par un modèle mathématique du système du compensateur qui comporte une source AC, une charge déséquilibrée et un compensateur. Afin d'élaborer ce modèle, un calcul de la valeur crête du courant de la source a été fait. Il comprend deux composantes telles que la première composante correspond à la puissance active fournie à la charge alors que la deuxième composante sert non seulement à fournir de la puissance active au compensateur pour maintenir la tension constante aux bornes du bus continu mais aussi à satisfaire et compenser les pertes de commutation, le courant de fuite du banc de condensateur et à régler l'énergie emmagasinée sur le banc de condensateur.

La première composante est calculée en fonction du produit de la valeur crête du courant total de la source par le facteur de puissance. Quant à la deuxième composante, elle est calculée en fonction de la capacité du bus dc, la tension de référence du bus dc, la tension moyenne du bus dc pendant une variation périodique, la valeur crête tension de la source et la

période de la variation périodique symétrique de la tension du bus dc aux bornes du condensateur. Ce qui donne ainsi le calcul de la valeur crête du courant total de la source.

Par la suite, une estimation des courants de référence triphasés instantanés de la source est nécessaire. Ces courants triphasés sont estimés en fonction du produit de la valeur crête du courant total de la source par les vecteurs des courants unitaires. Une deuxième estimation est nécessaire aussi; il s'agit des courants triphasés instantanés du compensateur. Ces derniers peuvent être estimés en faisant la différence entre les courants de charge détectés et les courants de référence triphasés de la source.

De plus, B. Singh et al. (1998) évoquent le contrôleur des courants basé sur la loi d'hystérésis en expliquant que les contrôleurs des courants pour chacune des trois phases correspondantes aux trois ponts fonctionnent indépendamment tel que chaque contrôleur de courant fournit un mode de commutation aux composants du compensateur. La logique de commutation est donnée par la suite.

Après avoir fait ces estimations, un modèle d'état représentant le compensateur est proposé. Ce modèle est traduit par quatre équations différentielles dont les trois premières décrivent les variations par rapport au temps des courants triphasés détectés à l'entrée du contrôleur en fonction de ces courants mêmes, inductances et des tensions triphasées MLI du côté de l'entrée AC du compensateur. Quant à la quatrième équation, elle traduit la variation par rapport au temps de la tension du bus dc en fonction de la capacité du bus dc et des courants charge/décharge vers le bus dc correspondant aux courants triphasés du compensateur.

En plus du modèle d'état décrivant le fonctionnement du compensateur, un deuxième modèle d'état décrivant la charge du système étudié est présenté. En effet, ce modèle comprend trois équations différentielles présentant la variation par rapport au temps des courants triphasés de la charge en fonction de ces derniers, des tensions simples triphasées de la source AC et des paramètres de la charge. Il a été mentionné que ces équations différentielles de premier ordre

sont résolues avec la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre pour pouvoir analyser le comportement transitoire et permanent du système de compensateur. Pour faire cette analyse, un logiciel est développé dans le langage FORTRAN et simulé sur Pentium PC.

Pour vérifier la performance du système proposé, une simulation de ce dernier est faite. Pour ce faire quatre cas sont étudiés; le premier s'agit de la simulation d'une charge triphasée équilibrée avec un facteur de puissance inductif et une variation de la puissance de la charge.

Le deuxième est tel qu'on retrouve les mêmes conditions que le premier sauf pour la charge qui est monophasée pour le deuxième cas étudié. Quant au troisième cas, il est également semblable au premier cas mais tout en remplaçant la charge triphasée par une charge biphasée. Pour finir, le quatrième cas étudie le système sous les mêmes conditions que le premier cas mais sous une variation du type de la charge, autrement dit, la simulation part avec une charge triphasée, puis cette dernière est remplacée par une autre charge biphasée dont la puissance est différente que celle de la triphasée pour ensuite la remplacer encore une fois par une autre charge monophasée dont la puissance varie de même. Puis, la modification du type de la charge est poursuivie en reprenant la même charge biphasée utilisée précédemment et elle est clôturée par la reprise de la charge triphasée simulée au début de ce quatrième cas. Pour ces quatre cas, une simulation est réalisée des courants et tensions triphasées de la source, des courants du compensateur et de la tension du bus dc.

Les résultats de la simulation montrent dans tous les cas que les courants de la source, les courants du compensateur ainsi que la tension du bus dc se stabilisent à des valeurs d'état stable suite à chaque changement apporté à la charge. De plus, la tension du bus dc est maintenue constante et les courants du compensateur changent instantanément suite à chaque changement de la charge. Toutes ces observations montrent bien que le compensateur a réussi non seulement la compensation de la charge réactive suite aux modifications apportées à la charge mais aussi à améliorer le facteur de puissance de la source AC jusqu'à même le rendre quasiment unitaire. Il parvient aussi à équilibrer les charges déséquilibrées.

Ainsi, le système du compensateur proposé par B. Singh et al. (1998) est bien performant et efficace et peut sans aucun doute être intégré dans les systèmes de distributions électriques, puisque grâce à la compensation réalisée des charges réactives, le pouvoir d'équilibrer les charges déséquilibrées et l'amélioration du facteur de puissance est ainsi possible. En effet, les systèmes de distributions électriques peuvent bénéficier du compensateur proposé. D'une part, ce compensateur permet améliorer leur efficacité et leur utilisation étant donné que la majorité des charges rencontrées dans l'industrie ne sont ni des charges réactives ni à facteur de puissance unitaire, ce qui entraîne la composante réactive du courant avec la composante active risquant ainsi de nuire aux systèmes de distributions électriques tout en entraînant un facteur de puissance faible, une efficacité faible du système électrique et une mauvaise utilisation de ce dernier. D'où la nécessité de l'intégration de tels compensateurs. Le compensateur proposé est facile à implémenter et ce en utilisant un onduleur à base d'IGBT avec une fréquence de commutation élevée et une puce unique de microcontrôleur, autrement dit un compensateur de haute qualité, pas cher et dépourvu d'harmoniques.

Vu l'importance du contrôle de la puissance réactive, S. Bisanovic et al. (2014) proposent une méthode qui permet ce type de contrôle au niveau des bancs de condensateur. Ce qui rend cette méthode assez intéressante c'est qu'elle est valable pour les charges existantes dans les réseaux de distributions électriques et industriels et qui sont plus au moins variables en termes de puissance réactive même si cette dernière possède un intervalle large de variations. De plus, grâce à cette méthode il est possible de fournir ou de consommer de la puissance réactive selon le besoin. En effet, certaines charges existantes entraînent une variation brusque de la demande en puissance réactive ce qui cause une variation de la tension au niveau du point d'alimentation, provoquant par la suite des interférences entre les charges des différents consommateurs. D'où le besoin impératif de parvenir à compenser pour ces charges la puissance réactive variable afin de respecter les limites de la tension d'alimentation. C'est l'un des objectifs de cette méthode qui a aussi pour but d'améliorer le profil de la tension, corriger le facteur de puissance, équilibrer les charges, réduire les pertes en puissance ainsi que les harmoniques, et ce tout en installant des bancs de condensateur

dont la puissance réactive est contrôlée en variant la réactance de l'inductance. La seule crainte associée à ces bancs de condensateurs c'est qu'ils peuvent entraîner des problèmes de résonance d'où la suggestion d'installer un large banc de condensateur au niveau du bus principal.

Le modèle du compensateur proposé dans cet article est composé d'un banc de condensateurs qui comporte neuf sections de condensateurs et une inductance. L'arrangement de ses composants représente la base du design de ce compensateur. En effet, un contrôle de la puissance réactive peut être effectué en adoptant cet arrangement et en variant la réactance de l'inductance. Des thyristors sont utilisés pour permettre soit l'activation ou le débranchement des différents condensateurs par phase pour faire en sorte que la valeur de la tension respecte l'intervalle prédéfini et désiré; il s'agit du contrôle obtenu suite à l'arrangement adopté.

Un arrangement des bancs des condensateurs est ainsi proposé et qui consiste à considérer trois bancs de condensateurs dont les capacités du deuxième et troisième sont exprimées par le ratio de la capacité du premier sur deux nombres réels positifs. En plus de ces trois bancs de condensateur, une inductance est aussi considérée et représentée par une impédance exprimée en fonction de la résistance et la réactance du. Cela permet d'établir une condition exprimée par une relation entre la capacité du premier banc de condensateur, la réactance de l'inductance et les deux nombres réels positifs mentionnés ce qui permet par la suite d'exprimer la tension aux bornes de l'impédance de l'inductance indépendamment de sa résistance et en fonction de la tension d'alimentation du réseau ainsi que les deux nombres réels positifs.

De plus, en considérant l'impédance des trois capacités et celle de l'inductance, il est possible d'exprimer l'admittance équivalente par phase en fonction de ces quatre impédances. La puissance apparente injectée par le réseau à l'arrangement de bancs de condensateur considéré est obtenue en faisant le produit de cette admittance et du carré de la tension d'alimentation. Ce qui permet par la suite d'exprimer le deux puissances active et

réactive en fonction du carré de la tension d'alimentation, la résistance et la réactance de l'inductance et la réactance du premier banc de condensateur.

Par la suite, en négligeant la résistance de l'inductance par rapport à sa réactance et celle du premier banc de condensateur il est possible de simplifier la puissance réactive et d'exprimer sa dérivée par rapport à la réactance de l'inductance qui s'est avérée être négative. Cela montre que la puissance réactive décroît en fonction de la réactance de l'inductance.

L'étude de cette fonction de la puissance réactive a permis d'exprimer deux réactances présentant le pôle et le zéro de cette fonction. En étudiant leur signe, il est clair que le pôle est inférieur au zéro ce qui permet de tracer ainsi la puissance réactive en fonction de la réactance de l'inductance, d'exprimer la puissance réactive du banc de condensateur dans le cas où l'inductance est déconnectée et de s'en servir pour donner l'expression de la puissance réactive. En effet, cette dernière peut être exprimée en fonction du pôle, du zéro et la puissance réactive du banc de condensateur quand l'inductance est déconnectée.

L'expression de la puissance réactive ainsi obtenue permet d'exprimer la puissance réactive minimale et maximale en remplaçant respectivement la valeur de la réactance de l'inductance par sa valeur minimale et maximale. Un rapport présentant le ratio de la puissance réactive maximale sur la puissance réactive minimale est déterminé.

Une étude de trois cas est réalisée; le premier cas test est tel que six paramètres des huit considérés sont connus, ainsi la tension d'alimentation du réseau, les deux nombres réels positifs, la réactance du premier banc de condensateur et un intervalle de variation de la puissance réactive défini par les deux puissances réactives minimale et maximale de l'inductance sont connus. Dans ce cas, les valeurs du pôle, du zéro et de la puissance réactive en cas de déconnection de l'inductance et de l'intervalle de variation défini par les deux réactances minimale et maximale peuvent être déterminées par la suite.

Le deuxième cas test qui s'avère être plus compliqué est tel que la tension d'alimentation du réseau, les deux nombres réels positifs, la réactance minimale de l'inductance et un intervalle de variation défini par les deux puissances réactives minimale et maximale sont les paramètres connus. Ce deuxième cas permet donc de déterminer les paramètres restants qui sont les valeurs du pôle, du zéro et de la puissance réactive en cas de déconnection de l'inductance et ainsi la valeur de la réactance du premier banc de condensateur et la valeur de la réactance maximale de l'inductance.

Pour finir, un troisième cas assez intéressant est aussi étudié et qui est tel que la tension d'alimentation du réseau, un intervalle de variation défini par les deux réactances minimale et maximale de l'inductance et les deux puissances réactives minimale et maximale sont connus. Ce qui permet de d'obtenir les autres paramètres comme la réactance du premier banc de condensateur et les deux nombres réels positifs définis précédemment.

L'analyse des résultats montre que le banc de condensateur choisi est bien efficace ; il permet la réduction des pertes en puissance, l'amélioration du profil de la tension. Ces résultats sont encore mieux à l'utilisation de deux bancs de condensateurs et expliquent bien le besoin de l'intégration des bancs de condensateurs comme compensateurs de la puissance réactive dans les réseaux de distributions électriques et industriels. Le compensateur proposé par cet article qui est constitué de bancs de condensateurs et d'inductances et qui peut soit absorber soit fournir de la puissance réactive dans le réseau de distribution électrique a pu atteindre l'objectif qui est l'amélioration du profil de la tension et la réduction des pertes en offrant un contrôle efficace de la puissance réactive.

Après avoir étudié les différents aspects de perturbations qui peuvent nuire à la qualité de l'onde, nous présenterons dans un deuxième temps l'étude et l'évaluation de l'impact que peut avoir l'introduction de quelques types de charges comme les véhicules électriques sur une installation électrique donnée raccordée au réseau.

1.2 Impact de l'introduction des stations de recharge pour les véhicules électriques sur le réseau électrique

De nos jours, le marché d'électricité ne cesse de se développer vu le développement industriel continu, ce qui se manifeste par un taux assez élevé de consommation d'énergie dans plusieurs secteurs notamment le secteur de transport. En effet, aux cours des dernières années, le secteur de transport a connu une forme de révolution particulière suite à l'introduction de l'électricité comme source d'énergie pour les véhicules électriques.

Cependant, l'utilisation de l'électricité comme source pour charger et satisfaire le besoin des véhicules électriques suscite l'étude et l'évaluation de la qualité de l'onde au sein d'un réseau électrique au niveau duquel des véhicules électriques sont raccordés. Pour ce faire, en se basant sur des études et travaux effectués auparavant, une étude sera présentée dans ce paragraphe et qui expliquera l'impact de l'introduction de deux types de véhicules électriques qui sont les véhicules électriques hybrides rechargeables PHEVs et les véhicules électriques rechargeables PEVs.

1.2.1 Véhicules électriques hybrides rechargeables PHEVs

Tan Ma et Osama. A. Mohammed. (2011) proposent la mise en place d'un modèle de lieu de stationnement pour les véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEVs). Ce lieu de stationnement est équipé d'un panneau photovoltaïque de $75KW$, d'un bus continu dc, d'un contrôleur du flux de puissance et du réseau de distribution. Le but de ce système est de charger les PHEVs en utilisant au maximum la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques (PV) et en s'assurant de réduire les effets de leur utilisation sur le réseau de distribution.

Pour cela, Tan Ma et Osama. A. Mohammed. (2011) ont présenté une description détaillée du système et de son mode de fonctionnement tel que chaque conducteur dès qu'il connecte sa voiture au lieu de stationnement, il doit régler l'heure prévue de son départ qui sera

enregistrée par le système pour qu'à cette heure, le niveau de charge des batteries atteint le minimum qui est 80% de leur capacité totale pour éviter que le véhicule consomme de l'essence.

Le système est tel que les chargeurs bidirectionnels dc-dc des PHEVs et l'interface de régulation dc-dc du panneau photovoltaïque sont connectés au bus continu dc-dc (318V) qui est connecté à son tour au réseau de distribution par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel DC/AC. Ainsi on aura un transfert de puissance entre le réseau de distribution AC et le garage de stationnement qui sert de station de recharge pour les PHEVs. Ce type de transfert qui est entre véhicules et réseaux (V2G) est accompagné d'un autre type de transfert de puissance qui est entre véhicules (V2V).

Pour permettre la participation des PHEVs aux transferts (V2G) et (V2V) tout en limitant leur impact sur le réseau, Tan Ma et Osama. A. Mohammed. (2011) ont pensé à introduire un algorithme intelligent de charge qui permet de régler et d'ajuster le taux de charge des PHEVs en tenant compte du flux de puissance estimé et des prix d'énergie fournie par le réseau. Ainsi, le contrôleur utilise le prix d'énergie et le flux de puissance estimé comme entrées pour avoir comme sortie le niveau de priorité de charge de chaque PHEV et le taux exact auquel il faut charger chaque PHEV.

Notons que le niveau de priorité de charge dépend de l'état de charge des batteries (SOC) et du besoin en puissance (P) de chaque PHEV. Donc, les PHEVs dont les niveaux de priorité sont 1 ($P \geq 15\text{kW}$), 2 ($10\text{kW} \leq P \leq 15\text{kW}$) et 3 ($5\text{kW} \leq P \leq 10\text{kW}$) doivent être chargés (SOC 10%) quant à ceux qui sont de niveaux de priorité 4 ($2\text{kW} \leq P \leq 5\text{kW}$) et 5 ($P \leq 2\text{kW}$) peuvent être déchargés pour participer aux services (V2G) et (V2V). Il faut signaler que le niveau de priorité et le taux de charge des batteries des PHEVs varient au cours du temps.

Ensuite, Tan Ma et Osama. A. Mohammed. (2011) ont présenté une comparaison entre les effets de l'opération de charge des PHEVs sur le réseau de distribution avec et sans le contrôleur intelligent.

En conclusion, le stationnement pour les PHEVs étudié a permis non seulement d'intégrer les énergies renouvelables mais aussi de charger les PHEVs en respectant leur besoin en puissance et leur niveau de priorité de charge. De plus, le système a permis de se servir des PHEVs d'ordre de priorité faible comme une source d'énergie supplémentaire pour les PHEVs de niveau de priorité élevé et comme un backup d'énergie au cas où l'énergie fournie par les PV ne répond pas aux besoins des PHEVs et le prix d'énergie fournie par le réseau est très élevé. Ainsi, en intégrant le contrôleur avec l'algorithme on a pu limiter l'impact des PHEVs sur le réseau de distribution, maximiser l'utilisation de la puissance des PV et s'assurer qu'à l'heure de départ du véhicule le taux de charge des batteries SOC de chaque PHEV est au-dessus de la limite qui est 80% de leur capacité totale.

D'un autre côté, A. Y. Saber et G. K. Venayagamoorthy. (2011) présentent une solution qui répond à des problèmes majeurs qui sont l'émission du gaz à effet de serre qui ne cesse d'affecter le climat, l'épuisement des réserves d'énergie conventionnels et le coût élevé de l'utilisation des centrales traditionnels pour le transport de l'électricité.

Ainsi, A. Y. Saber et G. K. Venayagamoorthy. (2011) proposent d'une part la maximisation de l'intégration des sources renouvelables principalement les panneaux photovoltaïques et les éoliennes et d'autre part l'utilisation des véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEVs) et PHEVs connectés au réseau électrique (V2G) appelés aussi « gridable vehicles » (GVs). La technique V2G est considérée comme un moyen de transfert du flux de l'énergie entre les batteries des PHEVs et le réseau électrique et de stockage de l'énergie. Avec cette technique, l'état de charge des batteries est toujours variable et les énergies renouvelables sont mieux utilisées.

De plus, l'intérêt du recours aux PHEVs est dû au coût élevé des fuels par rapport au coût de l'électricité. Cependant, l'utilisation de ce type de véhicules nécessite une source supplémentaire d'énergie pour répondre au pic de charge engendré sur le réseau électrique ce qui est assez cher, ce qui nous pousse à faire appel aux sources d'énergies renouvelables. Donc, pour un « smart grid » assez compliqué, il faut jouer sur l'optimisation de l'utilisation non seulement de sources d'énergie renouvelables mais aussi des « gridable vehicles ».

Cette optimisation a été explicitée par A. Y. Saber et G. K. Venayagamoorthy. (2011) par le fait que pour limiter les émissions suite au secteur de l'électricité et suite au secteur du transport il faut employer respectivement les sources d'énergie renouvelable et les GVs non seulement comme charges mais aussi comme sources d'alimentation mobiles et outils de stockage d'énergie. Ensuite, grâce aux GVs équipés d'un ordinateur qui peut calculer le prix d'électricité fournie par le réseau électrique et communiquer le taux de charge des batteries. Ainsi, en exploitant toutes ces données, on peut programmer une méthode pour mieux commander le système et utiliser de manière intelligente les GVs afin d'augmenter l'utilisation des sources d'énergie renouvelables dans le seul but de diminuer le coût d'électricité et de réduire les émissions.

Puis ces émissions provenant des véhicules dans le secteur du transport, elles peuvent être mesurées grâce à une fonction quadratique présentée par A. Y. Saber et G. K. Venayagamoorthy. (2011). Un calcul de la demande de la charge et des pertes du système a aussi été effectué. Quant au coût du fuel, il peut être calculé à l'aide d'une fonction de 2^{ème} ordre de la puissance générée. Toutes ces mesures ont pour but d'aboutir à un « smart grid », une charge équilibrée, des véhicules GVs dont les batteries contribuent à la technique V2G « registered GVs », la fiabilité et surtout une fonction objective qui traduit l'optimisation du coût et de l'émission pour un « smart grid ».

Pour expliquer d'avantage cette optimisation, A. Y. Saber et G. K. Venayagamoorthy. (2011) ont présenté un algorithme qui fait intervenir une méthode itérative appelée PSO définie par

deux catégories ; PSO binaire qui s'intéresse à trouver les états on/off des générateurs et PSO entier qui cherche à déterminer le nombre optimal des GV. Cet algorithme va permettre par la suite de réduire les émissions et le coût en intégrant les énergies renouvelables et les GV dans un « smart grid ».

Ensuite, pour tester la méthode d'optimisation, A. Y. Saber et G. K. Venayagamoorthy. (2011) ont simulé un système composé de dix unités avec 50000 « registered GV » tout en exploitant les données disponibles de la demande en charge des dix unités et les données des coefficients des émissions estimées et des générateurs. Par la suite, la simulation est réalisée pour deux cas ; le cas où les GV sont chargés en utilisant des générateurs conventionnels « load-leveling model » et le cas où les GV sont chargés à partir des sources d'énergie renouvelables quand ils sont considérés comme charges et déchargés en envoyant de l'énergie dans le réseau quand ils sont considérés comme sources « smart grid model ».

Finalement, l'étude effectuée par A. Y. Saber et G. K. Venayagamoorthy. (2011) a aboutit à une conclusion expliquant qu'en utilisant le modèle « load-leveling model », on n'a pas pu aboutir à une diminution intéressante du coût et des émissions. Par contre, en étudiant le deuxième modèle qui est le « smart grid model », c'est-à-dire qu'en intégrant la méthode d'optimisation PSO, on a réussi à créer un control réussi des GV pour un « smart grid » dans le but de réduire le coût et des émissions tout en employant les sources d'énergie renouvelables tel que les panneaux photovoltaïques (PV) et les éoliennes. Cependant, le capital qu'on doit investir pour réaliser un tel modèle et qui s'avère un peu cher, dépend principalement de l'endroit où on va implanter nos PV ou éoliennes ; donc il faut chercher un moyen pour trouver l'orientation optimale des PV ou des éoliennes et le comportement le plus favorable des GV dans le modèle « smart grid ».

D'un autre côté S. G. Wirasingha et al. (2008) Traitent l'intérêt que les États-Unis ont accordé aux véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEVs). Cet intérêt se manifeste par les plusieurs projets existant sur le marché des États-Unis et qui font intervenir les

PHEVs. De plus, cet article explique le mode opératoire des PHEVs, leur mode d'entraînement par rapports aux autres véhicules et pour les différentes classes de véhicules, l'impact de la technologie « vehicle to grid » (V2G) sur le réseau de distribution électrique.

Le recours aux PHEVs a été interprété par S. G. Wirasingha et al. (2008) par le fait que l'utilisation de ce type de véhicules offre l'opportunité d'avoir accès à d'autres sources d'énergie alternatives qui remplacent les fuels. Cette quête a été expliquée par plusieurs facteurs ; premièrement, les PHEVs sont plus convenables dans le cas de vitesse variable en termes d'efficacité et de capacité énergétique et aussi, ils permettent d'utiliser l'énergie perdue dans le freinage pour recharger leurs batteries. Deuxièmement, le marché des automobiles dans les États-Unis est dorénavant obligé de remplacer les véhicules conventionnels par d'autres qui consomment beaucoup moins de fuel vu qu'on a constaté une augmentation majeure en termes de demande en pétrole dans le monde accompagnée d'une augmentation des prix du pétrole et du gaz. Troisièmement, par rapport aux véhicules conventionnels, les PHEVs produisent beaucoup moins d'émissions de gaz à effet de serre surtout s'ils sont associés avec des sources d'énergies renouvelables.

Ensuite, S. G. Wirasingha et al. (2008) ont cité le mandat de l'état et fédéral et a mentionné les tendances que le USA a connu vis-à-vis des véhicules tel que tout a commencé par l'apparition des véhicules électriques (EVs) et des véhicules électriques hybrides (HEVs) comme remède pour la pollution et pour l'augmentation de la consommation du pétrole. Puis, le marché de l'USA a connu l'émergence des véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEVs) suite au besoin d'augmenter la capacité des batteries. Par la suite, les véhicules à piles à hydrogène ont été présentés comme solution pour la pollution et comme alternative pour le pétrole importé.

De plus, les composants principaux d'un PHEV (batteries, moteur, moteur à combustion interne) et la fonction de chaque composant ont été détaillé par S. G. Wirasingha et al. (2008) pour expliquer le mode de fonctionnement de ce type de véhicules. Puis, la technologie

« grid to vehicle » a été explicitée dans cet article en donnant l'évolution de la demande en électricité en fonction du pourcentage d'intégration des PHEVs ainsi que l'évolution des pics de charge en fonction de la durée de la charge ce qui a permis de voir l'impact de leur intégration sur le réseau électrique. En plus, la technologie « vehicle to grid » a été pareillement évoqué tout en expliquant de quoi elle s'agit et en représentant une configuration possible d'un système faisant intervenir cette technologie et un stationnement pour des PHEVs tout en précisant son mode de fonctionnement et ses atouts vs ses inconvénients.

En conclusion, S. G. Wirasingha et al. (2008) ont constaté que l'intégration des PHEVs semble garantir un avenir promettant pour l'USA où les émissions des gaz à effet de serre sont réduites, ce qui garantit le bien être des personnes.

Après avoir étudié l'impact de l'introduction d'un véhicule électrique hybride rechargeable PHEV sur le réseau électrique, nous passons dans ce qui suit à l'étude de l'aspect du même impact mais celui d'un véhicule électrique rechargeable PEV.

1.2.2 Véhicules électriques rechargeables PEVs

S. Deilami et al. (2011) proposent un algorithme de contrôle et de gestion en temps réel de la charge de plusieurs véhicules électriques rechargeables (PEVs) dans ce qu'on appelle un « smart grid ». Cette stratégie de contrôle « real-time smart load management » (RT-SLM) a été conçue dans le but de coordonner l'opération de charge des PEVs en mettant en priorité le véhicule dont l'état de charge de batterie est le plus faible. Ce type de contrôle permettra par la suite d'éviter tout impact sur le réseau électrique tels que : surcharge, fluctuations de tension, coupure d'électricité et rendre ainsi le réseau électrique plus performant, fiable et capable de répondre aux besoins amplifiés en énergie électriques des différentes charges. Pour vérifier l'efficacité de l'algorithme (RT-SLM), S. Deilami et al. (2011) ont réalisé une

simulation sur MATLAB d'un réseau résidentiel à basse et haute tension et connecté à plusieurs PEVs.

Pour coordonner l'opération de charge des PEVs, S. Deilami et al. (2011) ont énuméré différentes contraintes du système tel que la première concerne la tension de régulation du réseau de distribution, la deuxième consiste à imposer une valeur maximum de la demande en énergie électrique des PEVs requise du réseau de distribution pour éviter la surcharge. Ensuite, S. Deilami et al. (2011) ont mentionné une fonction objective de la coordination de l'opération de charge des PEVs qui permet d'améliorer l'économie d'un réseau électrique intelligent en réduisant les pertes en énergie du réseau et le coût investi pour l'achat ou la génération de l'énergie. De plus, cette fonction objective tient compte de la priorité de charge des PEVs suivant l'état de charge de leurs batteries et de la variation du prix de l'énergie tout au long de la journée. Puis, l'algorithme de contrôle RT-SLM qui va effectuer la coordination en temps réel des PEVs discutée ci-dessus, est décrit par S. Deilami et al. (2011) tel que c'est cet algorithme qui décide quel PEV va être chargé en premier. Il tient en compte aussi des trois zones de charges (zone Rouge : haute priorité, zone bleue : priorité moyenne et zone verte : priorité minimale) définies par S. Deilami et al. (2011) pour diminuer le coût de l'achat ou de la production de l'énergie.

Pour que cet algorithme puisse être appliqué en temps réel, il utilise une optimisation appelée « maximum sensitivities selection » (MSS) qui permet de quantifier la fonction objective définie précédemment. Pour vérifier l'efficacité de cet algorithme, un réseau résidentiel a été testé par S. Deilami et al. (2011) dans l'ouest de l'Australie en introduisant cet algorithme dans MATLAB et ont représenté la consommation en puissance du système, la déviation de la tension et les pertes totales du système en fonction du temps tout au long de la journée, sans et avec considération des zones de charge selon les préférences du conducteur.

Pour finir, S. Deilami et al. (2011) ont conclu que l'algorithme RT-SLM utilisant l'optimisation MSS est bénéfique vu qu'il a pu assurer l'économie de l'énergie, la réduction

du coût de l'énergie et des pics de puissance et a réussi d'éviter les surcharges et la rupture du service en offrant plutôt un service fiable et amélioré.

Par la suite, A. S. Masoum et al. (2011) traitent le même problème évoqué par S. Deilami et al. (2011), c'est-à-dire la réduction des pertes et l'écrêtage des pics de tensions en intégrant la méthode « smart load management » (SLM) dans un réseau résidentiel intégrant des stations de recharge pour plusieurs PEVs.

Ce qui diffère par rapport au travail effectué par S. Deilami et al. (2011), c'est la définition des zones de charge telle que S. Deilami et al. (2011) ont défini la zone bleue par l'intervalle [18:00h →22:00h] alors que A. S. Masoum et al. (2011) l'ont défini par l'intervalle [18:00h→01:00h]. De plus, la zone verte par S. Deilami et al. (2011) est définie par l'intervalle [01:00h →08:00h] alors qu'elle est définie par A. S. Masoum et al. (2011) par l'intervalle [18:00h→08:00h]. De plus, le système étudié par S. Deilami et al. (2011) est composé d'un nombre total de nœuds de 449 tandis que le système étudié par A. S. Masoum et al. (2011) comporte 1200 nœuds. Quant aux transformateurs de distribution, le système décrit par S. Deilami et al. (2011) utilise des transformateurs de type 100 kVA alors que ceux utilisés par A. S. Masoum et al. (2011) sont de type 300 kVA. Ensuite, le travail effectué par A. S. Masoum et al. (2011) n'utilise pas l'optimisation « maximum sensitivities selection » (MSS) ce qui est logique puisque le problème n'est pas traité en temps réel comme S. Deilami et al. (2011) l'ont fait.

Finalement, A. S. Masoum et al. (2011) ont abouti aux mêmes résultats obtenus par S. Deilami et al. (2011), c'est-à-dire, amélioration des performances du système de distribution, minimisation des pertes, régulation de la tension, réduction des pics de la demande en électricité, amélioration du service et le rendre plus sécurisé et fiable, éviter les surcharges qui nuisent au réseau électrique et assurer la satisfaction des clients en chargeant leurs PEVs.

P. Miltra et al. (2011) proposent un modèle de parc pour les PEVs qui présente aussi une station de recharge pour ces véhicules (SmartPark) connectée au réseau électrique. Ce travail vise à ce que ce SmartPark permette la compensation de la puissance réactive, autrement dit, il vise à ce que les PEVs se comportent comme des compensateurs statiques (STATCOM) virtuels tel qu'en étant connectés à la station de recharge, ils subviennent au besoin du réseau en lui transmettant de la puissance active et réactive. Ce type de transfert s'accompagne d'une diminution négligeable de l'état de charge (SOC) des batteries des PEVs, d'où le besoin d'intégration d'une stratégie de contrôle pour le convertisseur du côté réseau (GSC).

Ensuite, P. Miltra et al. (2011) suggèrent le développement de ce SmartPark autrement dit des STATCOM virtuels en les synchronisant avec des GSC d'un parc éolien (400MW) dans un système comportant 12 bus. De plus, ils expliquent clairement la stratégie de contrôle utilisée qui est contrôle des courants et qui satisfait les besoins en puissance active et réactive.

Après, un système test composé a été effectué par P. Miltra et al. (2011) comme suit : 12 bus, 4 générateurs dont le quatrième est substitué par le parc éolien et 12 SmartPark. En plus, le parc éolien est à base de générateurs à double alimentation et utilise des convertisseurs PWM. Notons que le stator est commandé par une commande vectorielle et le control du GSC est réalisé dans le but de garder la tension du bus constante. De plus, pour commander le GSC, un contrôleur intégral est utilisé pour générer la puissance réactive. Un schéma de la stratégie de contrôle en tension est donné.

Ce système est par la suite simulé en utilisant un simulateur digital en temps réel appelé RTDS. P. Miltra et al. (2011) Expliquent le recours à ce genre de simulateur et présentent ses avantages. Puis, suite à cette simulation, ils présentent et comparent d'une part la variation de la puissance réactive injectée avec le SmartPark et avec les STATCOM réels pendant la régulation de tension du bus 4, pendant la panne d'une ligne électrique et pendant un défaut triphasé au niveau du bus 4. Et d'autre part, les performances du control en tension des

STATCOM réels et des SmartPark pendant la variation de la puissance du parc éolien, pendant la panne d'une ligne électrique et pendant un défaut triphasé au niveau du bus 4. En outre, la variation de la tension du bus 6 avec le support de la puissance réactive coordonnée et obtenue du SmartPark est représentée et comparée avec celle obtenue suite au contrôle en tension du GSC et sans le support du SmartPark.

P. Miltra et al. (2011) terminent leur travail par une représentation et comparaison du courant efficace et de la puissance réactive du côté réseau premièrement avec le support de la puissance réactive coordonnée et obtenue du SmartPark et deuxièmement avec le contrôle en tension du GSC en éliminant le support du SmartPark.

CHAPITRE 2

INVENTAIRE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU CAMPUS UNIVERSITAIRE DE L'ÉTS

Avant de procéder à l'installation de tout type de charge sur le réseau électrique de l'ÉTS, il est nécessaire d'étudier ce réseau et ce en faisant la visite des différents pavillons.

En effet, cette visite permettra de faire l'inventaire des différentes artères dont l'objectif est de se familiariser avec tous les transformateurs électriques installés dans tout le campus et d'étudier par la suite les charges alimentées par ces transformateurs dont la puissance apparente nominale dépasse les 100kVA.

2.1 Identification des transformateurs électriques installés dans tout le campus et mise à jour de la fiche technique

Pour pouvoir identifier tous les transformateurs connectés au réseau électriques de l'ÉTS, une visite a été menée, accompagnée d'un technicien et ce, en commençant par les gros transformateurs dont la tension du primaire est égale à 25kV et la tension du secondaire est égale à 600 V.

En effet, ils existent sept transformateurs du type 25kV/600V qui alimentent différents bâtiments du campus universitaire. Parmi ces transformateurs, il y a deux transformateurs principaux T1 et T2 qui alimentent à la fois deux pavillons principaux A et B. Ensuite, au 5^{ème} étage du pavillon A, il se trouve le transformateur T6 qui alimente les CLUMEQ qui représentent un ensemble de cabines de serveurs installés au 4^{ème} étage du pavillon A. Puis, la visite a été poursuivie en passant au pavillon E où il est installé le transformateur T7 qui sert à alimenter ce pavillon qui comporte la maison des étudiants, Desjardins et Jean Coutu. Par la suite, une visite de la résidence PH3 a permis de voir le transformateur T4 qui alimente

le marché Metro, la résidence PH3 et la résidence PH4. Quant à la résidence PH1, la résidence PH2, le musée, le club AéroÉTS ainsi que le Centre de technologie thermique (CTT), ils sont tous alimentés par le transformateur T3 localisé dans le bâtiment du CTT. Pour finir avec les gros transformateurs, il suffit de traverser la rue vers le bâtiment nommé carrefour d'innovation INGO, pour faire une visite du transformateur T5 qui alimente évidemment le bâtiment en question.

Des photos de tous ces transformateurs électriques mentionnés ont été prises, ce qui a permis de prélever les spécifications de leurs plaques signalétiques. Ces spécifications sont représentées par le tableau 2.1 tout en précisant le pavillon et le local dans lequel se trouve chaque transformateur.

Tableau 2.1 Spécifications des plaques signalétiques des transformateurs 25kV/600V

Transfo	No. Série	Impédance Z (%)	S (kVA)	PRIM(kV)	SEC (V)	Couplage
Pavillon A						
Local SS270						
T1	FA-0042-13555	6,57	2250	25	600	Dy0
T2	FA-0041-13555	6,65	2250	25	600	Dy0
Pavillon A						
Local A-5001						
T6	XTF-0005-129091	6,97	2500	25	600	Yy0
CTT						
Local G-0105						
T3	XNH-0001-158520	6,96	1250	25	600	Yy0
Résidence PH3						
Local R3-S170						
T4	XBA-0001-177274	7,22	2500	25	600	Yy0
INGO						
Local 113						
T5	XTH-0003-139594	7,46	1500	25	600	Yy0
PAVE						
Local ES2011						
T7	XXG-0001-218536	10,43	3000	25	600	Dy0

Tel que c'était mentionné précédemment, ces sept transformateurs alimentent différentes charges dans différents bâtiments. Pour ce faire, il est possible de présenter un schéma qui permet d'illustrer tous les bâtiments du campus universitaire alimentés par ces transformateurs. Ce schéma est présenté par la Figure 2.1.

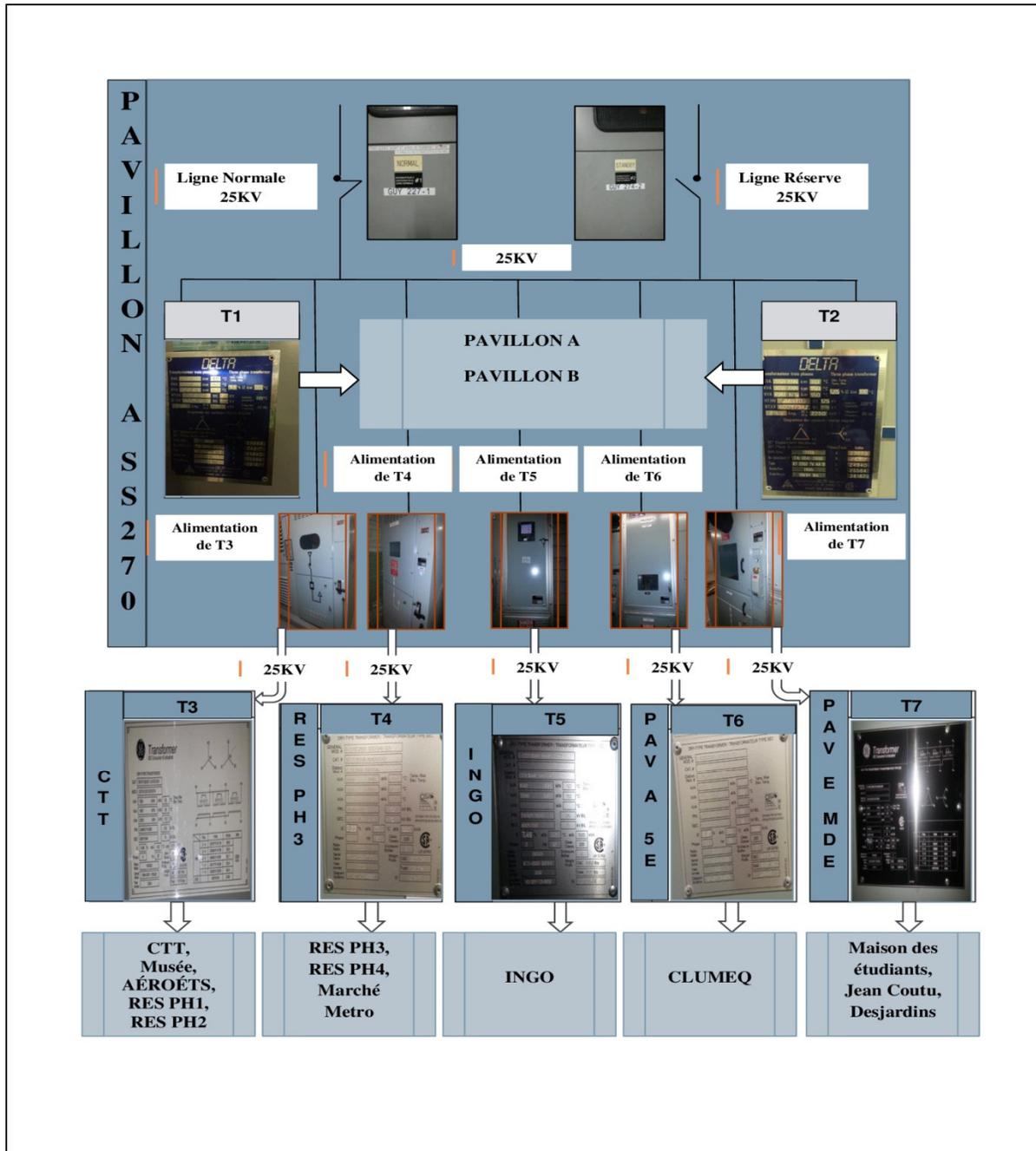


Figure 2.1 Diagramme de l'installation électrique du campus universitaire de l'ÉTS niveau 25kV

Après avoir précisé tous les transformateurs du type 25kV/600V et quels bâtiments sont alimentés par chacun d'entre eux, la visite des transformateurs a été poursuivie en passant au deuxième niveau de tension, c'est-à-dire avec ceux dont la tension primaire est égale à 600V et ce au niveau de tout le réseau électrique de l'ÉTS.

Cette visite a permis non seulement de récupérer les données des plaques signalétiques de tous les transformateurs, mais aussi de faire la mise à jour du réseau électrique de l'ÉTS. En effet, ce dernier ne cesse de se développer selon le besoin en puissance du campus, soit en enlevant, remplaçant ou en rajoutant des charges et ainsi des transfos, ce qui rend difficile la possibilité de garder le réseau électrique mis à jour.

De plus, cette mise à jour nous permettra par la suite d'identifier les charges de grandes puissances ce qui offre la possibilité d'analyser et discuter la consommation en puissance de tout le campus et facilitera la tâche de maintenance et de réparation pour le service de la gestion des actifs immobiliers à l'ÉTS.

Les données ainsi récupérées des transformateurs dont le primaire est connecté au bus 600V sont présentés par pavillon ou bâtiment dans le tableau 2.2. En effet, dans ce tableau, il est possible de voir le local exact de chaque transfo, les tensions du primaire et du secondaire, le numéro de série du transfo, le modèle du transfo, son catalogue et le type de couplage.

Tableau 2.2 Liste des Transformateurs installés dans le pavillon A

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
PAVILLON A									
A-SS270	TUA2S TPPFR	16395-0191 FA-0303-15590			5,20% 3,90%	30 225	600 600	208Y/120 208Y/120	D/Y D/Y
A-SS1 (A-S106)		13090-205 ENCL-1 ZNF-0009-158724	VZTC0015S000814	MS25A2 CZTC0015S000814	4% 2,70%	25 15	600 600	120/240 208Y/120	1 PH D/y
A-0729	TUAR	EJ-0570-X			5,20%	30	600	208Y/120	D/y
A-0640	T1-A-0640 T2-A-0640 T3-A-0640 T4-A-0640	D7777-1007 ENCLL A31113S03-7		BC3075S480 MT75A16 BC3075V BC3045V	4,20% 4,70% 4,60% 6,30%	75 75 75 45	600 600 600 600	277/480 440/254 120/108 120/208	D/y D/d D/y D/y
A-0350	TPP1R	FA-0304-15590			3,90%	225	600	208Y/120	D/y
A-0450	TBR	EG-0046-X			4,70%	100	600	120/240	1 PH
A-0552	TR 26-28-30 THR	DSD-0372-183825 EL-0806-X	CD3C0015S008290	CD3C0015S008290	5,38% 6,90%	15 45	600 600	230Y, 208Y 208Y/120	D/y D/y
A-0692	RC-TR-01 RC-TR-02 T3-A-0692	ZQB-0015-172673 DPJ-0863-171732 DPJ-0855-171732	VZ3C0112S006105 C8CT0112VH031600020 C8CT0045VH032600020	CZ3C0112S006105 CD3C0112VHA6XXBA CD3C0045VHB6X1BA	3,10% 4,96% 5,21%	112,5 112,5 45	600 600 600	208/120 // 208/120 208Y/120 208Y/120	D/z D/y D/y
A-0840	TPP HR TUDR	EK-0184-X FA-0678-15099			4,80% 5,90%	112,5 30	600 600	208Y/120 208Y/120	D/y D/y
A-1362	TPP A1 T2-A-1362	85TZA166 DRJ-0698-181404	CD3C0112VNA6XXBA	CD3C0112VNA6XXBA	7,30% 4,90%	112,5 112,5	600 600	208Y/120 380Y/219	D/y D/y
A-1508.1	TBI	FA-0643-15590			4,70%	100	600	120/240	1 PH
A-1538	T-A-1538	ZQB-0014-172673	VZ3C0150S006106	CZ3C0150S006106	2,97%	150	600	208/120 // 208/120	D/z
A-1531	T-A-1531	ZQB-0013-172673	VZ3C0150S006106	CZ3C0150S006106	2,97%	150	600	208/120 // 208/120	D/z
A-1850	TPP C1	85TZA167			4,90%	150	600	208Y/120	D/y
A-2150	TF2	EK-0256-X			4,70%	75	600	120/240	1 PH
A-2168	TE2 TRA2 T3-A-2168	EL-0548-X EK-0429-X		BC1007V	5,50% 5,90% 5,50%	37,5 75 7,5	600 600 600	120/240 208Y/120 120/240	1 PH D/y 1 PH
A-2354	TB2 TA2 T1	EL-0805-X ZLD-0010-147291 No. Référence 51477-8	VZTC0045S001933	CZTC0045S001933	6,90% 0,00% 6,58%	45 45 25	600 600 600	208Y/120 208/120 120/240	D/y D/y 1 PH
A-2536.1	T1-A-2536.1 T2-A-2536.1	M16C2902A-1 M15L1507B-1		BA2225S480 UA3225P480	0,45% 4,42%	225 225	600 480	480 208Y/120	Y/y D/y
A-2762	TPPJR T2-A-2762 T3-A-2762	FA-0422-X DWK-0903-214507 DSD-0140-183753	CD3C0075VKA6XXBA CD3C0112VRA6XXBA	CD3C0075VKA6XXBA CD3C0112VRA6XXBA	6,90% 4,94% 4,94%	45 75 112,5	600 600 600	480Y/277 240Y/139 480Y/277	D/y D/y D/y
A-2840	TPP D2 TRB 2	FA-0677-15099 FA-0168-15590			3,90% 6,40%	225 75	600 600	208Y/120 208Y/120	D/y D/y
A-3502	T1-A-3502 T1-A-3502	A61113-06A-1 ATC-0067-188377	CATC0112VRA6XCA	CATC0112VRA6XCA	2,00% 0,85%	775 112,5	600 600	460 480Y/277	Y/y Y/y
A-3540	03-TR-01 03-TU-01	ZQB-0011-172673 DPJ-0853-171732	VZ3C0150S006106 C8CT0045VH032600020	CZ3C0150S006106 CD3C0045VHB6X1BA	2,97% 5,21%	150 45	600 600	208/120 // 208/120 208Y/120	D/z D/y
A-3548	03-TR-02	ZQB-0012-172673 DTC-0912-188377 DPJ-0854-171732	VZ3C0150S006106 CD3A0112RHA6XXBA C8CT0045VH032600020	CZ3C0150S006106 CD3A0112RHAGXXBA CD3C0045VHB6X1BA	2,97% 5,86% 5,21%	150 112,5 45	600 480 600	208/120 // 208/120 208Y/120 208Y/120	D/z D/y D/y
A-3886	TPP A3 TRA3 TUA3	EK-0129-X ZKL-0001-145161 A40330-03A-1	VZTC0045S001564	CZTC0045S001564 BC3045VZZ	4,80% 5,80% 5,60%	112,5 45 45	600 600 600	208Y/120 208/120 // 208/120 208Y/120	D/y D/z D/y
A-3853	TPP C3 TF3	EK-0178-X FA-0679-15099			4,80% 6,90%	112,5 45	600 600	208Y/120 208Y/120	D/y D/y
A-4508	04-TR-02	ZQF-0004-174782 DXJ-0799-221556 DQB-0713-173465	VZ3C0075S0064 CD3C0030VKA6XXBB CD3C0030S006256	CZ3C0075S0064 CD3C0030VKA6XXBB CD3C0030S006256	5,89% 5,11% 5,11%	75 30 30	600 600 600	208/120 // 208/120 240Y/139 240Y/139	D/z D/y D/y
A-5001			9TCT0009VH031600020	CDTC0009VHAGXXBA	5,07%	9	600	208Y/120	D/y
A-5004		D7034-206 ENCL2		MDT63A4-P	4,00%	63	600	480/277	D/d
A-5012			9T83K9892		6,00%	30	600	208/120	D/y
TOIT		EJ-0571-X			5,20%	30	600	208/120	D/y

Tableau 2.3 Liste des Transformateurs CLUMEQ installés dans le pavillon A

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
CLUMEQ PAVILLON A									
A-4530	TRANSFO 04-09		9T83K9893		5,20%	45	600	208/120	D/y
CLQ	TRANSFO 04-08	1888		HIET-30-600-415-225-S	3,90%	225	600	415Y/240	D/y
	TRANSFO 04-07	1843		HIET-00-600-415-225-S	3,60%	225	600	415Y/240	D/y
	TRANSFO 04-06	1887		HIET-30-600-415-225-S	3,90%	225	600	415Y/240	D/y
	TRANSFO 04-05	1842		HIET-00-600-415-225-S	3,60%	225	600	415Y/240	D/y
	TRANSFO 04-04	1889		HIET-30-600-415-225-S	3,90%	225	600	415Y/240	D/y
	TRANSFO 04-03	1841		HIET-00-600-415-225-S	3,60%	225	600	415Y/240	D/y

Tableau 2.4 Liste des Transformateurs installés dans le pavillon B

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
PAVILLON B									
B-0102	RC-TR-01 TR03	DMK-0753-155213	9TCT0112VH0316310201	CDTC0112S000159	3,40%	112,5	600	208Y/120	D/y
	RC-TU-01 TR04	DMK-0759-155213	9TCT0030VH0316310201	CDTC0030S004745	4,50%	30	600	208Y/120	D/y
	RC-TR-02	ZLH-0013-148495		CZTC0045S002008	0,00%	45	600	208Y/120	D/y
B-1102	01-TR-01 TR05	ZML-0041-155878	VZTC0150S002869	CZTC0150S002869	3,8% / 3,4%	150	600	208/120 // 208/120	D/z
	01-TA-01 TR06	DMK-0760-155213	9TCT0045VH0316310201	CDTC0045S000844	5,60%	45	600	208Y/120	D/y
B-2102	02-TR-01 TR07	ZML-0042-155878	VZTC0150S002869	CZTC0150S002869	3,8% / 3,4%	150	600	208/120 // 208/120	D/z
	02-TA-01 TR08	DMK-0756-155213	9TCT0030VH0316310201	CDTC0030VHAGXXBA	5,10%	30	600	208Y/120	D/y
B-3102	03-TR-01 TR09	DMK-0752-155213	9TCT0112VH0316310201	CDTC0112S000159	3,40%	112,5	600	208Y/120	D/y
	03-TU-01 TR10	DMK-0755-155213	9TCT0030VH0316000201	CDTC0030VHAGXXBA	5,10%	30	600	208Y/120	D/y
B-4102	04-TR-01 TR11	DMK-0754-155213	9TCT0075VH0316310201	CDTC0075S000313	4,40%	75	600	208Y/120	D/y
B-4602	04-TR-02 TR12	A31003-10A-1		BC2375P575S460K4	4,60%	375	575	460	Y/y
B-SS216	S2-TR-01 TR01	DMK-0757-155213	9TCT0030VH0316000201	CDTC0030VHAGXXBA	5,10%	30	600	208Y/120	D/y
	S2-TU-01 TR02	DMK-0758-155213	9TCT0030VH0316000201	CDTC0030VHAGXXBA	5,10%	30	600	208Y/120	D/y

Tableau 2.5 Liste des Transformateurs installés dans la résidence phase 1

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
RESIDENCE PHI									
R1-T01 AP	ASC. #1	5775-598-ESS		MDI03A4	4,50%	20	600	480/277	D/d
R1-T02 AP	ASC. #2	Pas clair		MDI03A4	4,50%	20	600	480/277	D/d
R1-00084	TA BUANDERIE	DHF-0793-26690	C11279HCUX	CDTC0112VHA6XXBA	4,80%	112,5	600	208Y/120	D/y
	TX-A	DHF-0355-26401	C75S42HX	CDSA0075VKA6XXLA	6,90%	75	600	120/240	1 PH
	TX-B	DHF-0357-26401	C75S42HX	CDSA0075VKA6XXLA	6,90%	75	600	120/240	1 PH
R1-00146	TX-C	DHF-0356-26401	C75S42HX	CDSA0075VKA6XXLA	6,90%	75	600	120/240	1 PH
		DQB-0547-173317	CD3C0045VHA6XXBA	CD3C0045VHA6XXBA	6,07%	45	600	208Y/120	D/y

Tableau 2.6 Liste des Transformateurs installés dans la résidence phase 2

Local	TRANSFO	No. de série	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
RESIDENCE PH2								
R2-T01 AP	ASC. #1	46313HP8A01	DM020PK	4,90%	20	600	480Y/277	D/y
R2-T02 AP	ASC. #2	46313HP8A01	DM020PK	4,90%	20	600	480Y/277	D/y
R2-00109	TX-A	A01010S06-6	BA1100V	6,90%	100	600	120/240	1 PH
R2-00143	TX-C	A01010S06-2	BA1100V	6,90%	100	600	120/240	1 PH
	TX-B	A0052S01-2	BA1100V	6,70%	100	600	120/240	1 PH

Tableau 2.7 Liste des Transformateurs installés dans la résidence phase 3

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
RESIDENCE PH3									
R3-3144	03-TR-01	DVJ-0545-205747	CD1C0100VKA6XXLD	CD1C0100VKA6XXLD	4,56%	100	600	120/240	1 PH
R3-S170	SS-TU-01	DRB-0402-177220	C8CT0015VH0316000202	CD3C0015VHA6XXBB	5,38%	15	600	208Y/120	D/y
	SS-TR-01	DRB-0403-177220	C8CT0112VH0316000202	CD3C0112VHA6XXBB	4,90%	112,5	600	208Y/120	D/y
R3-3170	04-TU-02	DRB-0399-177220	C8CT0015VH0316000202	CD3C0015VHA6XXBB	5,38%	15	600	208Y/120	D/y
	04-TR-01	DRB-0394-177220	C8CT0150VH0316000202	CD3C0150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y
R3-3172	04-TR-02	DRB-0396-177220	C8CT0150VH0316000202	CD3C0150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y
	04-TU-01	DRB-0398-177220	C8CT0015VH0316000202	CD3C0015VHA6XXBB	5,38%	15	600	208Y/120	D/y
R3-9170	10-TU-02	DRB-0400-177220	C8CT0015VH0316000202	CD3C0015VHA6XXBB	5,38%	15	600	208Y/120	D/y
	10-TR-01	DRB-0397-177220	C8CT0150VH0316000202	CD3C0150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y
R3-9172	10-TR-02	DRB-0395-177220	C8CT0150VH0316000202	CD3C0150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y
	10-TU-01	DRB-0401-177220	C8CT0015VH0316000202	CD3C0015VHA6XXBB	5,38%	15	600	208Y/120	D/y

Tableau 2.8 Liste des Transformateurs installés dans la résidence phase 4

Local	TRANSFO	No. De catalogue	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
RESIDENCE PH4							
R4-105	TL-RA	9T83K9896	5,10%	150	600	208Y/120	D/y
R4-123	TL-RB	9T83K9897	5,40%	225	600	208Y/120	D/Y
R4-525	TRANSFO TU	9T83K9893	5,20%	45	600	208Y/120	D/y
R4-913	TRANSFO TL-8B	9T83K9897	5,40%	225	600	208Y/120	D/Y
R4-904	TRANSFO TL-8A	9T83K9897	5,40%	225	600	208Y/120	D/y

Tableau 2.9 Liste des Transformateurs installés dans le marché Metro

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
MARCHÉ METRO									
Metro	MA-TR-0102	DRB-0404-177220	C8CT0225VH0316000202	CD3C0225VHA6XXBB	5,88%	225	600	208Y/120	D/y
SSI	MA-TR-0101	DRB-0411-177220	C8CT0300VH0316000202	CD3C0300VHA6XXBB	5,53%	300	600	208Y/120	D/y
	T3-SSI-Metro	DRH-0149-180405	CDSC0005VKA6XXLA	CDSC0005VKA6XXLA	4,47%	5	600	120/240	1 PH
	MA-TU-0101	DRH-0153-180551	VKTC0030VHA6C1BA	CDTC0030VHA6C1BA	4,45%	30	600	208Y/120	D/y

Tableau 2.10 Liste des Transformateurs installés dans le centre d'innovation INGO

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
INGO									
113	TR-401		9T83K9892		6%	30	600	208Y/120	D/y
	TR-402	DTJ-0478-190326	C8CS0025VK0316001201	CD1C0025VKA6XXLA	5,95%	25	600	120/240	1 PH
			9T83K9892		6%	30	600	208Y/120	D/y
209	02-TR-401	DVC-0690-201226	VKTC0075VHA6C1BA	CDTC0075VHA6C1BA	4,31%	75	600	208Y/120	D/y
309			9T83K9891		4,80%	15	600	208Y/120	D/y
409	04-TR-401	DVC-0684-201226	VKTC0112VHA6C1BA	CDTC0112VHA6C1BA	3,42%	112,5	600	208Y/120	D/y
608			9T83K9891		4,80%	15	600	208Y/120	D/y
708	07-TR-401	DVC-0685-201226	VKTC0112VHA6C1BA	CDTC0112VHA6C1BA	3,42%	112,5	600	208Y/120	D/y
807			9T83K9891		4,80%	15	600	208Y/120	D/y
909	09-TR-401		9T83K9892		6,00%	30	600	208Y/120	D/y
1001.1	ASC. # 1	D7888-1210ENCL2		MDT63A4-P	4%	63	600	480/277	D/d
	ASC. # 2	D7887-1210ENCL2		MDT51A4-P	4%	51	600	480/277	D/d

Tableau 2.11 Liste des Transformateurs installés dans le centre de technologie thermique CTT

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
CTT MUSÉE									
G-0105	T1-G-0105	211851	T211851		4,91%	112,5	460	575Y/332	D/y
	T2-G-0105	P08207	83-60-6492SH		2,51%	60	480/575	15/20/25	D/y
	T11	DQB-0714-173465	CD3C0030VHA6XXBA	CD3C0030VHA6XXBA	5,11%	30	600	208Y/120	D/y
S0020	T4	DXK-1043-222663	CD3C0075VRA6XXBB	CD3C0075VRA6XXBB	4,94%	75	600	480Y/277	D/y
S0002	T9	DPD-0463-169209	VKTC0045VHA6C1BA	CDTC0045VHA6C1BA	6,50%	45	600	208Y/120	D/y
	T10	DPD-0464-169209	CDSC0015VKA6XXLA	CDSC0015VKA6XXLA	4,90%	15	600	120/240	1 PH
S0009A	TRANSFO-T1	DLC-0668-146966	T3Q30075A5VXX	CDTA0075VHA6XXBA	6,90%	75	600	208Y/120	D/y
S0027	T12	Modèle 51477-5			6,58%	25	600	120/240	1 PH
	TRANSFO T2	DLC-0669-146966	T3Q30075A5VXX	CDTA0075VHA6XXBA	6,90%	75	600	208Y/120	D/y
S0010A	T8	FF-0615-X			4,80%	15	600	120/240	1 PH
R0103	T14	0620454-SP 7359				900	600	480	D/y
CM-412	TRANSFO T3	DLC-0670-146966	T3Q30030A5VXX	CDTA0030VHA6XXBA	6,90%	30	600	208Y/120	D/y

Tableau 2.12 Liste des Transformateurs installés dans le pavillon E; Maison des étudiants

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (KVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
PAVILLON E-MAISON DES ÉTUDIANTS									
E. S2-013	TR-SS2-2	DXJ-0363-219658	C8CT0225VH0316000202	CD3C0225VHA6XXBB	5,88%	225	600	208Y/120	D/y
	TRANSFO CHILLER 1	371-614 ENCL1		MT300A18	4%	300	600	460Y/266	D/y
	TRU-SS2-1	DXJ-0359-219658	C8CT0015VH0316000202	CD3C0015VHA6XXBB	5,07%	15	600	208Y/120	D/y
	TRU-SS2-2	DXJ-0360-219658	C8CT0015VH0316000202	CD3C0015VHA6XXBB	5,07%	15	600	208Y/120	D/y
	TRANSFO CHILLER 2	372-614 ENCL1		MT300A18	4%	300	600	460Y/266	D/y
E. 2027A		DYF-0935-226814	VK3C0045VHA6C1BB	CD3C0045VHA6C1BB	5,52%	45	600	208Y/120	D/y
4e étage	TR-4-1	DYE-1043-226112	CD3C0030VHA6XXBA	CD3C0030VHA6XXBA	5,08%	30	600	208Y/120	D/y
6-001	TR-A-1	DXH-0857-219658	C8CT0150VH0316000202	CD3C02150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y
6-002	TRU-A-2	DXJ-0361-219658	C8CT0015VH0316000202	CD3C0015VHA6XXBB	5,07%	15	600	208Y/120	D/y
	TRU-A-1	DXJ-0362-219658	C8CT0030VH0316000202	CD3C0030VHA6XXBB	5,11%	30	600	208Y/120	D/y

D'autre part, en comparant les transformateurs figurant dans le tableau 2.1 avec la fiche technique des transformateurs de tout le campus et les plans électriques de l'ÉTS fournis par le service d'équipement de l'ÉTS, il est clair que ces derniers ne sont pas à jour. D'où l'utilité de cette visite technique.

En effet, il est primordial de réaliser une mise à jour continue d'une installation électrique donnée afin d'améliorer en permanence la qualité de l'énergie et la performance de cette installation. En revanche, pour la suite de ce travail, l'étude s'intéressera aux transformateurs dont la puissance apparente est supérieure ou égale à 100kVA. Pour ce faire, une mesure sera réalisée de toutes les charges du campus de l'ÉTS connectées aux transformateurs électriques de 100kVA et plus.

Cependant, avant d'effectuer ces mesures, il est important d'exploiter les données obtenues suite à la visite technique réalisée auparavant afin d'avoir tous les paramètres de l'installation électrique du campus universitaire étant donné qu'ils serviront pour la simulation du réseau électrique de l'ÉTS qui sera présentée dans la suite de ce travail et plus précisément dans le troisième chapitre. Les paramètres qui feront l'objet du calcul sont les impédances des transformateurs et des câbles de l'intégralité de l'installation électrique étudiée.

2.2 Calcul de l'impédance des transformateurs et des câbles de l'installation électrique du campus universitaire

Vu que les spécifications des plaques signalétiques des transformateurs ont été déjà obtenues suite à la visite de l'installation électrique de l'ÉTS, il nous reste de calculer leurs impédances, ainsi que celles des câbles électriques.

2.2.1 Calcul de l'impédance des câbles

Pour le calcul de l'impédance des câbles, les plans du réseau électrique de l'ÉTS sont utilisés pour pouvoir estimer la longueur des câbles et prélever leur section.

Il faut noter que le calcul de l'impédance nécessite le calcul de la partie résistive ainsi que la partie inductive. En effet, pour calculer la partie résistive des câbles $R_{câble}(\Omega)$, il suffit d'appliquer l'équation suivante

$$R_{câble} = \frac{\rho l}{S} (\Omega) \quad (2.1)$$

ρ Résistivité des câbles en (Ωm) qui dépend de la nature de son matériau ;

l Longueur des câbles en (m) ;

S Section des câbles en (m^2).

La majorité des câbles de l'installation électrique de l'ÉTS sont en cuivre à l'exception de quelques-uns qui sont en Aluminium. Ainsi, pour ceux qui sont en cuivre, la résistivité est égale à $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega m$ alors que pour ceux qui sont en aluminium la résistivité est telle que $\rho = 2.8 \times 10^{-8} \Omega m$.

Quant à la partie inductive, le calcul de cette dernière s'avère plus compliqué que celui de la partie résistive. En effet, en plus de la résistivité, la longueur et le diamètre des câbles, il faut

tenir compte de quelques autres paramètres. Ces paramètres figurent dans la méthode de calcul de la partie inductive de l'impédance proposée par Brian C. Wadell. (1991) comme suit :

$$L_{c\grave{a}ble} = 0.002l \left[\text{Ln} \left[\left(\frac{4l}{d} \right) \right] - 1 + \left(\frac{d}{2l} \right) + \frac{\mu r T(x)}{4} \right] (\mu H) \quad (2.2)$$

$L_{c\grave{a}ble}$ Inductance ou partie inductive de l'impédance d'un câble en (μH);

l Longueur du câble en (cm) ;

d Diamètre du câble en (cm) ;

r Rayon du câble en (cm) ;

μ Perméabilité magnétique absolue du câble en (H / m).

Pour le calcul de la perméabilité absolue du câble μ , nous appliquons le produit de la perméabilité du vide μ_0 et la perméabilité relative μ_r donné par l'équation suivante :

$$\mu = \mu_0 \mu_r (H / m) \quad (2.3)$$

La perméabilité du vide est une constante qui est telle que $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$. Quant au calcul de la perméabilité relative μ_r , Brian C. Wadell. (1991) a présenté la table 9.3.2 dans le chapitre 9 qui illustre les différentes valeurs possibles de la perméabilité relative et ce selon le type du matériau du câble (cuivre, aluminium, argent...) et que nous présentons par une capture donnée dans ce qui suit par la figure 2.2.

Il nous reste à définir la fonction $T(x)$ et la variable x figurant dans l'équation (2.2) de l'inductance $L_{c\grave{a}ble}$. Pour le cas de $T(x)$, il s'agit d'une fonction qui corrige la valeur de l'inductance sous les effets de l'alimentation alternative AC. Cette fonction est exprimée en fonction de la variable x comme le montre l'équation suivante :

$$T(x) = \sqrt{\frac{0.873011 + 0.00186128x}{1 - 0.278381x + 0.127964x^2}} \quad (2.4)$$

La variable x qui figure dans l'équation de la fonction $T(x)$ est généralement limitée par un intervalle tel que $0 \leq x \leq 100$ et qui peut être calculée comme suit :

$$x = 2\pi r \sqrt{\frac{2\mu f}{\sigma}} \quad (2.5)$$

f La fréquence exprimée en (Hz) ;

σ La conductiité du câble en (S/m).

Comme le cas de la perméabilité relative μ_r , la conductiité σ a été donnée par Brian C. Wadell. (1991) dans la table 9.3.2 du paragraphe 9.3.6 du chapitre 9. Comme le montre cette table, la conductiité du câble dépend de la nature du matériau de celui-ci.

Pour avoir une meilleure idée sur les différentes valeurs que peuvent prendre la perméabilité relative μ_r , et la conductance σ , nous présentons la capture effectuée de la table 9.3.2 élaborée par Brian C. Wadell. (1991) :

Material	μ_r	ϵ_r	$\sigma(S / m)$	ρ / ρ_{Cu} (unitless)	ρ / ρ_{Al} (unitless)
Silver	0.99998	1	6.17×10^7	0.9335	0.6645
Copper	0.999991	1	5.76×10^7	1.0000	0.7118
Aluminum	1.00002	1	3.72×10^7	1.5484	1.1022
Sodium	1	1	2.1×10^7	2.7429	1.9524
Brass	1	1	2.56×10^7	2.2500	1.6016
Tin	1	1	0.87×10^7	6.6207	4.7126
Graphite	1	1	0.01×10^7	576.0	410.0
Gold	1	1	4.10×10^7	1.4049	1.000
Steel ¹	1,000		$0.14-0.77 \times 10^7$	7.481-41.143	5.324-29.286
Stainless Steel	1,000		0.11×10^7	52.364	37.273
Mumetal	100,000				
Solder	1		0.7×10^7	8.2286	5.8571
Nickel	600		1.45×10^7	3.9724	2.8276

Table 9.3.2: Electrical Properties of Common Metals

Figure 2.2 Table des valeurs de la conductance et de la perméabilité relative pour les différents matériaux des câbles
Tirée de Transmission Line Design Handbook (1991, p.451)

Pour mieux comprendre la méthode de calcul proposée ci-dessus des deux parties résistive et inductive de l'impédance des câbles, soit l'exemple d'un câble en cuivre de longueur 10m, de grosseur 2/0 AWG (American Wire Gauge) dont nous intéressons à calculer l'impédance totale.

Commençons par le calcul de la partie résistive du câble tout en appliquant l'équation (2.1). Pour la résistivité, puisqu'il s'agit d'un câble en cuivre elle est égale à $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega m$, il nous reste ainsi à avoir la section du câble en m^2 et ce en se servant de la table de conversion qui donne les diamètres des câbles correspondants à leurs différentes grosseurs en AWG telle que donnée par International Hydraulics Inc. (2007-2017), ce qui est conforme au code canadien de l'électricité. Cette table sera présentée dans l'ANNEXE II. En effet, pour un câble de grosseur 2/0 AWG, nous avons un diamètre égale à $9.27mm$. Ainsi, nous pouvons calculer la section de ce câble qui est donnée par :

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (9.27 \times 10^{-3})^2}{4} = 0.0649 \times 10^{-3} m^2$$

D'où, la partie résistive de l'impédance du câble considéré est telle que :

$$R_{c\grave{a}ble} = \frac{\rho}{S} \times l = \frac{1.7 \times 10^{-8}}{0.0649 \times 10^{-3}} \times 10 = 2.5188 m\Omega$$

Nous passons maintenant au calcul de la partie inductive du même câble. Nous définissons pour ce faire la fréquence dans laquelle nous opérons qui est égale à 60Hz, la constante de perméabilité en vide qui est $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$, le diamètre du câble considéré qui est égal à 9.27mm ce qui donne le rayon du câble :

$$r = \frac{d}{2} = \frac{9.27}{2} = 4.635 mm = 0.4635 cm$$

Ensuite, pour pouvoir calculer la variable x , nous allons nous servir de la table donnée précédemment par Brian C. Wadell. (1991) présentée par la figure 2.2 et qui tel que pour un câble de type cuivre donne une conductance égale à $\sigma = 5.76 \times 10^{-7} S/m$ et une perméabilité résistive égale à $\mu_r = 0.999991 S/m$, ce qui permet d'avoir la perméabilité magnétique absolue en appliquant la formule présentée dans l'équation (2.3) ce qui donne :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = 4\pi \times 10^{-7} \times 0.999991 = 12.5652 \times 10^{-7} (H / m)$$

Il est possible ainsi de calculer la variable x telle que :

$$x = 2\pi r \sqrt{\frac{2\mu f}{\sigma}} = 2\pi \times 0.4635 \sqrt{\frac{2 \times 12.5652 \times 10^{-7} \times 60}{5.76 \times 10^7}} = 0.000005$$

Le calcul de la variable x donne le calcul de la fonction $T(x)$ qui est donné par l'équation (2.4) tel que en intégrant la valeur obtenue de x et nous obtenons :

$$T(x) = \sqrt{\frac{0.873011 + 0.00186128x}{1 - 0.278381x + 0.127964x^2}} = \sqrt{\frac{0.873011 + 0.00186128 \times 0.000005}{1 - 0.278381 \times 0.000005 + 0.127964(0.000005)^2}}$$

Ce qui donne :

$$T(x) = 0.934351$$

Donc, grâce au calcul effectué de tous les paramètres nécessaires pour la détermination de la partie inductive du câble pris comme exemple nous pouvons finalement donner la valeur de la partie inductive de l'impédance de notre câble tout en appliquant l'équation (2.2) :

$$L_{c\grave{a}ble} = 0.002l \left[\ln \left[\left(\frac{4l}{d} \right) \right] - 1 + \left(\frac{d}{2l} \right) + \frac{\mu r T(x)}{4} \right]$$

$$L_{c\grave{a}ble} = 0.002 \times 10 \times 10^2 \left[\ln \left[\left(\frac{4 \times 10 \times 10^2}{9.27 \times 10^{-1}} \right) \right] - 1 + \left(\frac{9.27 \times 10^{-1}}{2 \times 10 \times 10^2} \right) + \frac{12.5652 \times 10^{-7} \times 0.4635 \times 0.934351}{4} \right]$$

$$L_{c\grave{a}ble} = 15.2078011 \mu H$$

Ainsi, nous avons pu déterminer non seulement la partie résistive mais aussi la partie inductive de l'impédance du câble, ce qui permet d'écrire que pour un câble en cuivre de longueur 10m et de grosseur 2/0 AWG nous obtenons :

$$\begin{cases} R_{c\grave{a}ble} = 2.5188 m\Omega \\ L_{c\grave{a}ble} = 15.2078011 \mu H \end{cases}$$

Pour pouvoir passer à la simulation avec MATLAB/SimPowerSystems (SPS) du réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS, qui sera réalisée dans la suite de ce travail et plus précisément dans le chapitre 3, nous avons effectué ce calcul pour tous les câbles de l'installation électrique de tout le campus et qui sera présenté dans la simulation.

2.2.2 Calcul de l'impédance des transformateurs

Après avoir calculé les impédances des câbles et pour pouvoir simuler le réseau électrique de tout le campus de l'ÉTS, il nous reste le calcul des impédances des transformateurs, et pour ce faire nous allons nous intéresser uniquement aux transformateurs ayant une puissance apparente supérieure ou égale à 100kVA. Dans ce cas, il faut calculer non seulement la partie résistive mais aussi la partie inductive des impédances des transformateurs.

En effet, l'impédance totale des transformateurs est donnée par l'équation suivante :

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T \quad (2.6)$$

R_T Partie résistive de l'impédance du transformateur ;

X_T Partie inductive de l'impédance du transformateur.

Ainsi, il est possible d'obtenir le module de l'impédance Z_T tel que :

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.7)$$

La démarche adoptée pour effectuer le calcul des impédances des transformateurs est basée dans un premier temps sur la valeur de l'impédance Z prélevée en pourcentage (%) à partir de la plaque signalétique de chaque transformateur et obtenue suite à la visite effectuée avec le technicien ; ces valeurs des impédances en pourcentage (%) figurent dans le tableau 2.2 vu précédemment.

Dans un deuxième temps, la démarche de calcul des impédances des transformateurs adopte un calcul approximatif inspiré des essais de production effectués par la compagnie General Electric (GE) puisque la plupart des transformateurs sont construits par General Electric (GE).

Pour mieux expliquer cette démarche, nous allons présenter trois exemples de trois transformateurs. En effet, nous avons demandé à Général Électrique de nous fournir les essais de production faits pour le transformateur T3 par M. Lessard de Général Électrique. (2004), pour le transformateur T4 par Paul-André Plante de Général Électrique. (2008) ainsi que pour le transformateur T6 par D. Therriault de Général Électrique. (2010) du type 25kV/600V présentés au début de ce chapitre. Rappelons que le transformateur T3 alimente le CTT, AéroÉTS et les deux résidences PH1 et PH2. Quant au transformateur T4, il alimente le marché Metro ainsi que les résidences PH3 et PH4. Et pour le transformateur T6, il alimente les serveurs CLUMEQ installés au quatrième étage du pavillon A.

Les résultats de ces essais sont visualisés par la Figure 2.3 qui suit :

ESSAI DE PRODUCTION / PRODUCTION TEST						T3	
KVA:	1250	RISE:	80 dC	DATE:	2004-09-03		
PRI:	24940 Y	PHASE:	3	# W.O.:	158520		
SEC:	600 Y	Hz:	60	PROJET:	Université du Québec, ETS		
TYPE:	CXTA1250 S003574	# SER.:	XNM-0001-158520	REP:	GE Ind.System, Miss.		
IMPEDANCE:							
Mesuree a / measured at:	23.3 dC	IR:	0.63%	IX:	6.92%	IZ:	6.95%
Corrigee a / corrected at:	100 dC	IR:	0.77%	IX:	6.92%	IZ:	6.96%
ESSAI DE PRODUCTION / PRODUCTION TEST						T4	
KVA:	2500 ANN	°C RISE:	150	DATE:	2008-02-11		
PRI:	24940 Y 125 KV BIL	PHASE:	3	W.O.#:	177274		
SEC:	600 Y 10 KV BIL	Hz:	60	PROJ:	ETS RÉSIDENCES ÉTUDIANTES		
Distinct Mod #:	CX3C2500 S007046	SER #:	XRA-0001-177274	REF:	GE Consumer & Industrial		
GENERAL MOD #:	E-CX3C2500 S007046-001						
IMPÉDANCE							
IMPEDANCE							
Mesurée à / measured at:	22.7 °C	IR:	0.65%	IX:	7.16%	IZ:	7.19%
Calculée à / calculated at:	170 °C	IR:	0.92%	IX:	7.16%	IZ:	7.22%
ESSAI DE PRODUCTION / PRODUCTION TEST						T6	
KVA:	2500 ANN	°C RISE:	150	DATE:	2010-08-10		
PRI:	24940 Y 125 KV BIL	PHASE:	3	W.O.#:	189091		
SEC:	600 Y 10 KV BIL	Hz:	60	PROJ:	Université McGill, CLUMEQ		
Distinct Mod #:	CX3C2500 S009234	SER #:	XTF-0005-189091	REF:	GE Consumer & Industrial		
GENERAL MOD #:	E-CX3C2500 S009234-001						
IMPÉDANCE							
IMPEDANCE							
Mesurée à / measured at:	24.7 °C	IR:	0.66%	IX:	6.91%	IZ:	6.94%
Calculée à / calculated at:	170 °C	IR:	0.92%	IX:	6.91%	IZ:	6.97%

Figure 2.3 Essais de production pour les transformateurs T3, T4 et T6
Tirée de Général Électrique (2004, p.2), (2008, p.2) et (2010, p.2)

Comme nous pouvons le voir, la figure 2.3 donne des captures du calcul des impédances des trois transfos considérés tout en montrant les valeurs des parties résistives et inductives de ces impédances. Ces fiches techniques fournies par la compagnie General Electric (GE) de production de la plupart des transformateurs installés sur le campus universitaire sont présentées en intégralité dans l'ANNEXE I.

En analysant le calcul effectué au cours des essais de production réalisés pour ces trois transformateurs, une constatation a été faite. En effet, pour mieux démontrer cette constatation, il est préférable de reprendre le calcul des impédances effectué pour ces trois transformateurs.

Soit le transformateur T3, qui a pour impédance Z_3 qui est telle que :

$$Z_3 = 6.96\% \text{ Avec } \begin{cases} X_3 = 6.92\% \\ R_3 = 0.77\% \end{cases}$$

Quant au transformateur T4, son impédance Z_4 est égale à :

$$Z_4 = 7.22\% \text{ Avec } \begin{cases} X_4 = 7.16\% \\ R_4 = 0.92\% \end{cases}$$

Et pour l'impédance Z_6 du transformateur T6, elle est calculée telle que :

$$Z_6 = 6.97\% \text{ Avec } \begin{cases} X_6 = 6.91\% \\ R_6 = 0.92\% \end{cases}$$

Donc, si nous observons bien les résultats obtenus ci-dessus des impédances des trois transformateurs, il est clair que la partie inductive X est presque égale à l'impédance totale Z

Pour la partie résistive R_T pour ces trois transformateurs, elle est déduite à partir de l'équation (2.7), c'est-à-dire :

$$R_T = \sqrt{Z_T^2 - X_T^2} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.8)$$

Ainsi, pour le reste des transformateurs de 100kVA et plus, et afin de bien choisir les paramètres de ces derniers que nous allons insérer par la suite dans la simulation de l'installation électrique de tout le campus universitaire, tout en utilisant le logiciel MATLAB/SimPowerSystems (SPS) dans le chapitre 3, nous avons suivi le même esprit de calcul utilisé dans ces essais de production. Autrement dit, nous choisissons une valeur de l'inductance X presque égale à la valeur de l'impédance donnée par la plaque signalétique de chaque transformateur et nous déduisons par la suite la résistance R .

Cependant, les valeurs des impédances obtenues à partir des plaques signalétiques sont données en pourcentage (%), tandis que dans la simulation, il faut insérer la partie résistive et la partie inductive des impédances transformateurs en ohm (Ω). Pour cela, avant d'entamer la simulation, un calcul supplémentaire est nécessaire et sera appliqué aux impédances données en pourcentage (%), et donc appliqué aussi à la partie résistive et la partie inductive de l'impédance de chaque transformateur et ce en appliquant la formule donnée par APQ. (2015) et présentée par l'équation (2.9) :

$$Z_T \text{ (}\Omega\text{)} = \frac{U_2^2 \text{ [KV]} Z \text{ [%]}}{S \text{ [MVA]} 100} \quad (2.9)$$

- U_2 Tension au secondaire du transformateur en kilovolt (kV) ;
- S Puissance apparente nominale du transformateur en Méga volt Ampère (MVA) ;
- Z Impédance du transformateur en pourcentage (%).

Par contre, dans les paramètres du bloc qui servira de modèle SimPowerSystems (SPS) pour le transformateur et que nous allons voir par la suite dans le chapitre 3 dans la simulation du réseau électrique de l'ÉTS, il faudrait définir l'impédance résistive et inductive pour le primaire et le secondaire du transformateur.

Pour cela, nous aurons besoin de définir des équations pour le cas d'un transformateur ramené du côté secondaire en utilisant le modèle de Thévenin tel que :

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} \quad \text{Où} \quad \begin{cases} R_T (\Omega) = R_{2T} + m^2 R_{1T} \\ X_T (\Omega) = X_{2T} + m^2 X_{1T} \end{cases} \quad (2.10)$$

R_{1T}, R_{2T}	Impédances résistives du primaire et secondaire du transformateur ;
X_{1T}, X_{2T}	Impédances inductives du primaire et secondaire du transformateur ;
M	Rapport de transformation.

Le rapport de transformation est calculé tel que :

$$m = \frac{U_2}{U_1} \quad (2.11)$$

Où U_1 et U_2 représentent respectivement les tensions du primaire et du secondaire du transformateur.

Puisque nous avons toutes les données nécessaires comme les impédances des câbles, les longueurs des câbles, les impédances des transformateurs ainsi que leurs tensions au niveau du primaire et du secondaire et ce pour l'intégralité de l'installation électrique du campus de l'ÉTS, il est possible ainsi de passer à la simulation de cette installation dans laquelle nous

allons juste nous intéresser aux transformateurs de grandes puissances c'est-à-dire dont les puissances apparentes nominales sont supérieures ou égales à 100kVA.

En revanche, avant de passer à la simulation du campus universitaire, il est nécessaire d'étudier et mesurer la consommation en temps réel de toutes les charges alimentées par les transformateurs ayant une puissance apparente nominale supérieure ou égale à 100kVA. Ces mesures seront présentées dans la première partie du chapitre suivant

CHAPITRE 3

MESURES EXPÉRIMENTALES EN TEMPS RÉEL ET SIMULATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU CAMPUS UNIVERSITAIRE DE L'ÉTS

Après avoir effectué la visite de l'installation électrique du campus universitaire, il serait intéressant de connaître la consommation réelle de ce dernier. Pour ce faire, nous allons nous intéresser aux charges alimentées par les transformateurs dont la puissance apparente est supérieure ou égale à 100kVA.

Pour pouvoir connaître la consommation réelle de tout le campus, nous sommes allés sur place avec trois analyseurs et nous les avons connectés au niveau de chaque charge alimentée par chaque transformateur. Ces trois analyseurs branchés à la sortie du transformateur sont ensuite connectés à une prise réseau. Cette connexion nous permettra de visualiser toutes les données de consommation en temps réel de chaque charge sur une interface d'un logiciel conçu par Schneider Electric ; cette interface s'appelle Vista Powerlogic.

Après avoir obtenu tous les résultats expérimentaux grâce à cette connexion analyseur-interface Vista Powerlogic, une simulation de l'intégralité du réseau électrique de l'ÉTS a été réalisée en utilisant le logiciel MATLAB/SimPowerSystems (SPS) tout en y transférant les résultats en temps réels obtenus avec Vista Powerlogic. Cela permet de voir ce qui se passe en pratique en temps réel au lieu de se limiter à ce qui se passe en théorie.

3.1 Mesures Expérimentales Avec le logiciel Vista Powerlogic de Schneider Electric

Vista Powerlogic est une interface de logiciel conçue par Schneider Electric qui permet de visualiser en temps réel les mesures obtenues dès la connexion des analyseurs à la sortie des transformateurs de grandes puissances, c'est à dire dont la puissance apparente est supérieure ou égale à 100kVA.

Cette interface est présentée par la figure 3.1 :

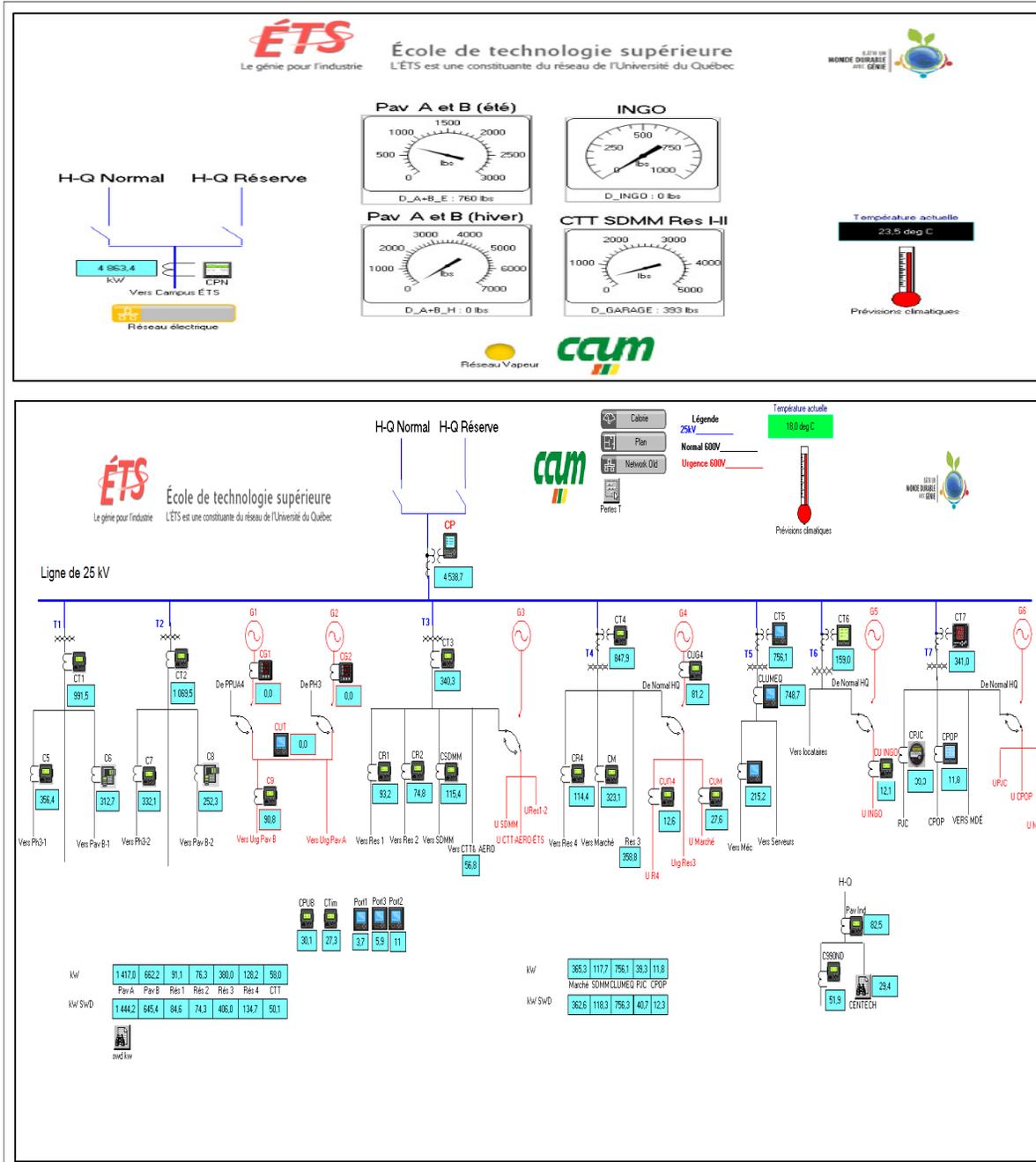


Figure 3.1 Réseau électrique de l'ÉTS sur l'interface Vista Powerlogic de Schneider Electric
Tirée du logiciel Vista Powerlogic de Schneider Electric

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.1, l'interface présente les sept transformateurs du type 25kV/600V vus dans le chapitre 2 et qui sont connectés à un bus de tension 25kV alimenté par deux lignes provenant d'Hydro-Québec dont l'une est normale qui est fonctionnelle en permanence, tandis que l'autre est une ligne réserve qui n'est activée qu'en cas de besoin d'une ligne back up.

De plus, cette interface comporte des compteurs de puissance (CP, CT1, CT2, CT4, CT5, CT6, CT7, C5, C6, C7, C8, C9, CR1, CR2, CR4, CUR4, CUM, CM, CSDMM, CTim, CPUB, CLUMEQ, CPOP, CPJC) installés soit en amont soit en aval des transformateurs 25kV/600V et qui permettent d'afficher le profil de consommation en temps réel des différents bâtiments du campus qui figurent de même dans l'interface VISTA.

D'autre part, ce diagramme comprend six génératrices d'urgence (G1, G2, G3, G4, G5, G6) qui ne fonctionnent que dans le cas de panne d'électricité (arrêt instantané, incendie, blackout...) et tel qu'au niveau de quelques-unes de ces génératrices ils existent des compteurs de puissance (CG1, CG2, CUG4) donnant aussi leur consommation.

Pour finir, les analyseurs avec lesquels nous nous sommes déplacés pour mesurer le profil de consommation en temps réel des différentes charges alimentées par les transformateurs de 100kVA et plus, sont représentés dans l'interface Vista par les trois portables figurant sous les noms Port1, Port2 et Port3.

En effet les trois portables représentant les trois analyseurs permettant de visualiser d'une part les valeurs en temps réel des tensions et courants par/entre phases, leurs formes d'ondes, leurs spectres harmoniques et leur taux de distorsions harmoniques THD, et d'autre part l'évolution des profils des puissances actives, réactives et apparentes.

Il faut savoir que les trois analyseurs utilisés pour effectuer toutes les mesures en temps réel sont de types Powerlogic ION 7650 qui sont des équipements conçus de Schneider Electric.



Figure 3.2 Analyseur PowerLogic ION 7650 de Schneider Electric utilisé pour les mesures en temps réel

Toutes ces données et mesures ont pu être récoltées au niveau de chaque charge alimentée par tout transformateur de grande puissance et installé dans le campus universitaire.

Pour effectuer les mesures en temps réel au niveau des charges, nous nous sommes basés d'une part sur les plans électriques fournis par le service d'équipement de chaque pavillon et bâtiment pour voir approximativement quelle charge est alimentée par quel transformateur et dans quel étage se trouve-t-elle par rapport au transformateur en question. Et d'autre part, sur la mise à jour réalisée suite à notre visite sur place avec le technicien des transformateurs étant donné que plusieurs d'entre ces derniers ne figurent ni sur les plans électriques ni sur la fiche technique fournie par le service d'équipement. En plus, même au niveau des plans électriques, les charges que nous pouvons vraiment voir sont juste des panneaux électriques mais il n'y a aucune indication sur le type de charge qu'alimente chaque panneau. D'où la nécessité et le besoin d'aller sur place en personne pour effectuer la visite technique de ces panneaux.

En plus, des photos ont été prises de chaque transformateur et de chaque charge connectée à celui-ci pour mieux comprendre le type de charges et mieux interpréter les résultats obtenus suite à ces mesures.

Cependant avant de donner les résultats obtenus suite à ces mesures, il est important d'expliquer la manière dont nous avons procédé pour avoir ces mesures en temps réel. En premier lieu, après avoir identifié le transformateur et la charge correspondante, chaque analyseur est connecté à l'aide de trois pinces aux deux/trois phases de la charge selon le type de charge en question. Pour réaliser ce type de connexion, et vu que la plupart des charges rencontrées étaient des panneaux électriques, il a fallu ouvrir ces derniers pour accéder aux câbles qui représentent les phases électriques de la charge. Ensuite, il faut connecter l'analyseur à la prise réseau et régler les paramètres de celui-ci y compris les paramètres de tension, le type de connexion et le type des charges (monophasée, biphasée, triphasée).

La figure 3.3 présente un exemple de mesures effectuées aux bornes d'un panneau tout en connectant l'un de ces trois analyseurs.



Figure 3.3 Exemple de mesures réalisées au niveau d'un panneau alimenté par l'un des transformateurs

En deuxième lieu, il faut communiquer avec le service des technologies de l'information pour activer la prise réseau et nous fournir l'adresse IP correspondante à cette prise. L'adresse IP de cette prise réseau sera insérée non seulement dans l'analyseur mais aussi dans l'interface Vista Powerlogic de Schneider Electric et ce tout en accédant l'interface Management Console et en modifiant l'adresse IP pour chaque analyseur figurant dans le Management Console sous les noms Portable (Port1 dans Vista), Portable 2 (Port 2 dans Vista) et Portable 3 (Port 3 dans Vista).

Soit la figure 3.4 qui montre cette interface Management Console.

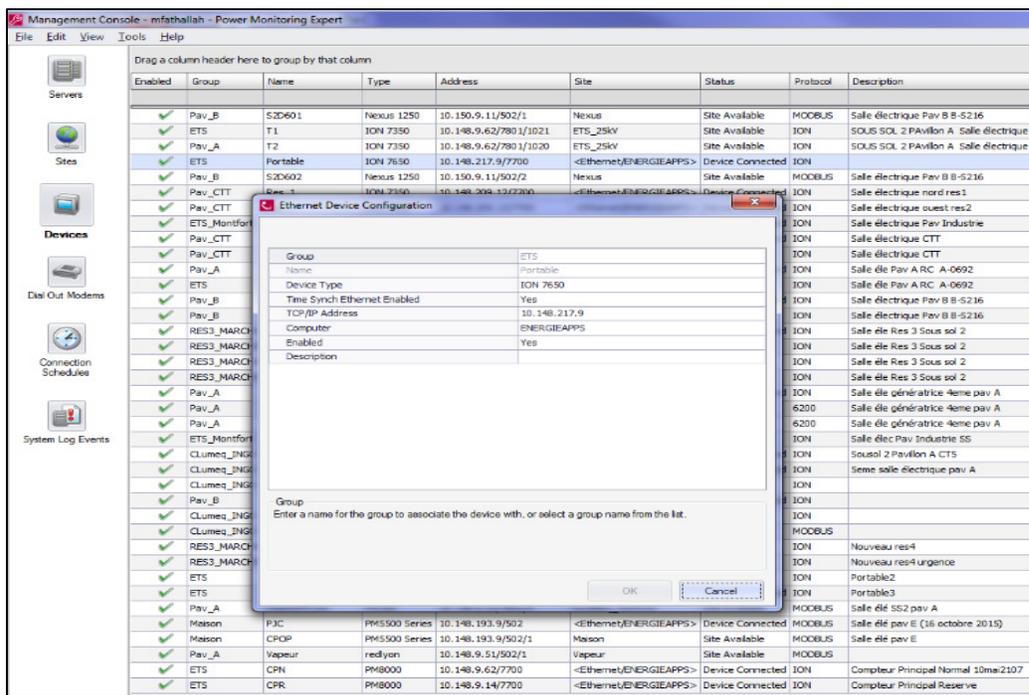


Figure 3.4 Interface Management Console
Tirée du logiciel Vista Powerlogic de Schneider Electric

Il faut savoir que tous les analyseurs connectés à ces transformateurs ont été branchés pendant au moins 24 heures pour avoir plus de précision et couvrir le plus de période de consommation réelle possible des différentes charges.

Les mesures sont enregistrées par le logiciel Vista Powerlogic de Schneider Electric chaque cinq minutes. Pour avoir une bonne idée sur les pavillons ou bâtiments que nous avons mesurés, nous présentons le schéma suivant pris de l'interface Vista.

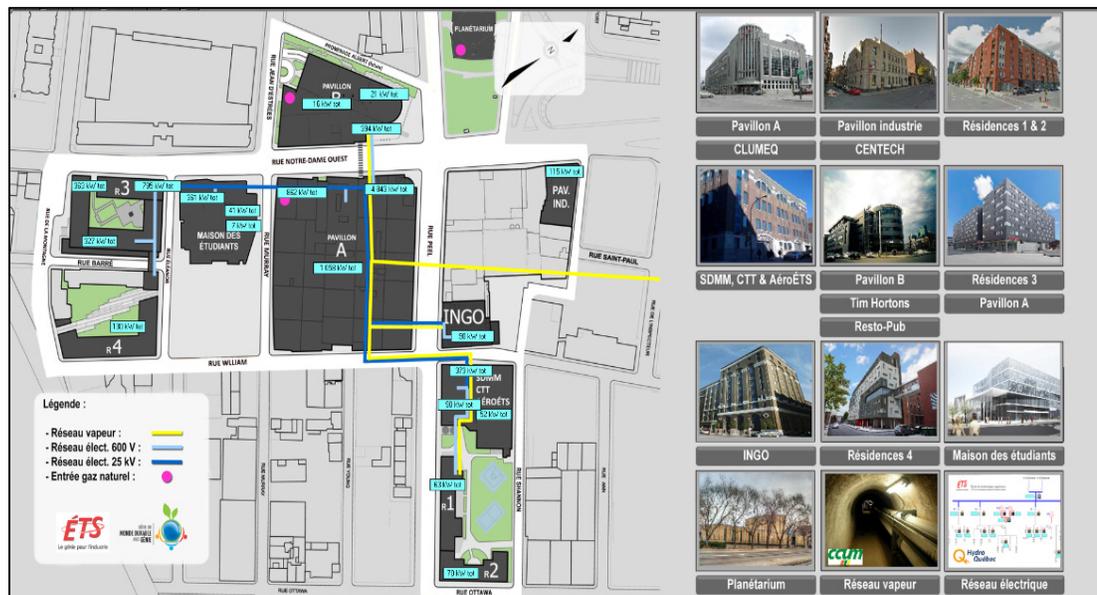


Figure 3.5 Pavillons et bâtiments du Campus de l'ETS
Tirée du logiciel Vista Powerlogic de Schneider Electric

Dans la suite de ce paragraphe, nous allons présenter les résultats des mesures obtenus par pavillon et bâtiment du campus universitaire, ainsi nous allons commencer par les charges alimentées par les transformateurs installés dans le pavillon principal ; pavillon A.

3.1.1 Mesure en temps réel des charges installées dans le pavillon A

Puisque nous allons nous intéresser qu'aux transformateurs de puissances apparentes supérieures ou égales à 100kVA, nous avons rassemblé ces transformateurs installés dans le pavillon A dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Tableau 3.1 Transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le pavillon A

PAVILLON A									
Local	TRANSFO	No. de série	No. de catalogue	Modèle	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
A-0350	TPP1R	FA-0304-15590			3,90%	225	600	208Y/120	D/y
A-0450	TBR	EG-0046-X			4,70%	100	600	120/240	1 PH
A-0692	RC-TR-01	ZQB-0015-172673	VZ3C0112S006105	CZ3C0112S006105	3,10%	112,5	600	208/120 // 208/120	D/z
	RC-TR-02	DPJ-0863-171732	C8CT0112VH0316000201	CD3C0112VHA6XXBA	4,96%	112,5	600	208Y/120	D/y
A-0840	TPP HR	EK-0184-X			4,80%	112,5	600	208Y/120	D/y
A-1362	TPP A1	85TZA166			7,30%	112,5	600	208Y/120	D/y
	T2-A-1362	DRJ-0698-181404	CD3C0112VNA6XXBA	CD3C0112VNA6XXBA	4,90%	112,5	600	380Y/219	D/y
A-1508.1	TB1	FA-0643-15590			4,70%	100	600	120/240	1 PH
A-1531	T-A-1531	ZQB-0013-172673	VZ3C0150S006106	CZ3C0150S006106	2,97%	150	600	208/120 // 208/120	D/z
A-1850	TPP C1	85TZA167			4,90%	150	600	208Y/120	D/y
A-2536.1	T1-A-2536.1	M16C2902A-1		BA2225S480	0,45%	225	600	480	Y/y
	T2-A-2536.1	M15L1507B-1		UA3225P480	4,42%	225	480	208Y/120	D/y
A-2762	T3-A-2762	DSD-0140-183753	CD3C0112VRA6XXBA	CD3C0112VRA6XXBA	4,94%	112,5	600	480Y/277	D/y
A-2840	TPP D2	FA-0677-15099			3,90%	225	600	208Y/120	D/y
A-3502	T1-A-3502	A61113-06A-1		BC2775S460DR	2,00%	775	600	460	Y/y
	T2-A-3502	ATC-0067-188377	CATC0112VRA6XCA	CATC0112VRA6XCA	0,85%	112,5	600Y/346	480Y/277	Y/y
A-3540	03-TR-01	ZQB-0011-172673	VZ3C0150S006106	CZ3C0150S006106	2,97%	150	600	208/120 // 208/120	D/z
A-3548	03-TR-02	ZQB-0012-172673	VZ3C0150S006106	CZ3C0150S006106	2,97%	150	600	208/120 // 208/120	D/z
	T2-A-3548	DTC-0912-188377	CD3A0112RHA6XXBA	CD3A0112RHAGXXBA	5,86%	112,5	480	208Y/120	D/y
A-3853	TPP C3	EK-0178-X			4,80%	112,5	600	208Y/120	D/y
A-3886	TPP A3	EK-0129-X			4,80%	112,5	600	208Y/120	D/y

Par la suite, nous allons présenter les résultats expérimentaux obtenus suite aux mesures réalisées au niveau de chaque charge alimentée par chacun de ces transformateurs figurant dans le tableau 3.1. Les résultats de ces mesures seront interprétés dans la suite de notre étude dans le chapitre 4.

Pour entamer nos mesures, nous nous sommes dirigés vers le local A-0450 au rez-de-chaussée où un transformateur y était installé. Il s'agit du transformateur monophasé TBR ayant une puissance apparente nominale égale à 100kVA et représenté par la figure 3.6.

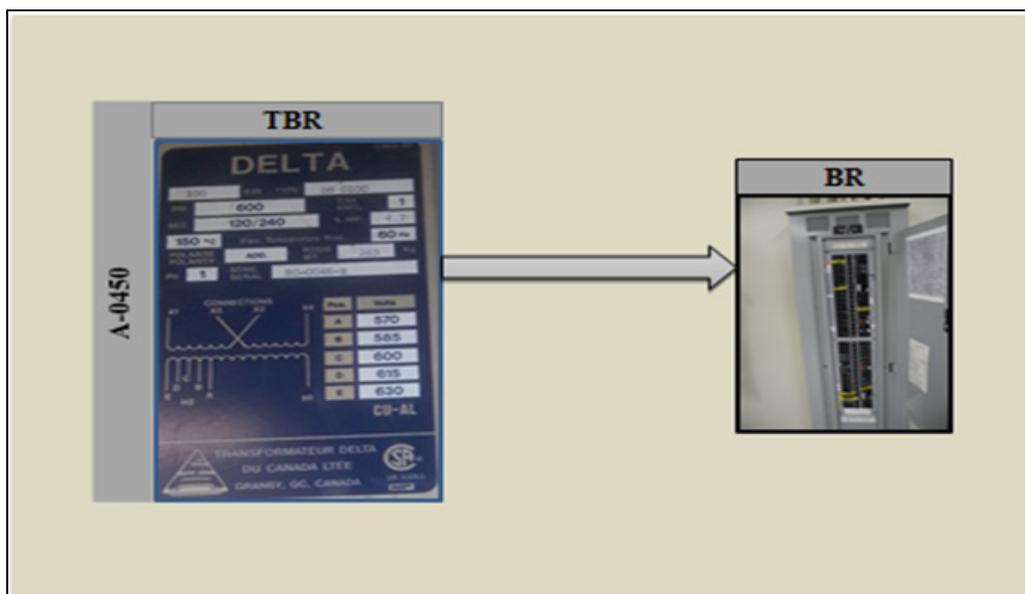


Figure 3.6 Charge alimentée par le transformateur TBR

Comme nous pouvons le voir, le transformateur monophasé TBR alimente une charge monophasée qui est constituée du panneau monophasé BR. Ce panneau alimente plusieurs autres charges telles que : une étuve blanche, une thermopompe qui est la TP-32 installée dans la salle A-0668, une pompe de puisard PP-1 installée au sous-sol du pavillon A et plus précisément dans le quai A-S487. De plus BR alimente de même la salle A-0466, trois ventilateurs d'évacuation qui sont le VE-60 dans la salle A0464, le VE-55 dans la salle A0477 et le VE-74 dans la salle A0464.

Après avoir spécifié les différentes charges alimentées par le panneau BR, nous présentons les mesures obtenues pour le panneau BR.

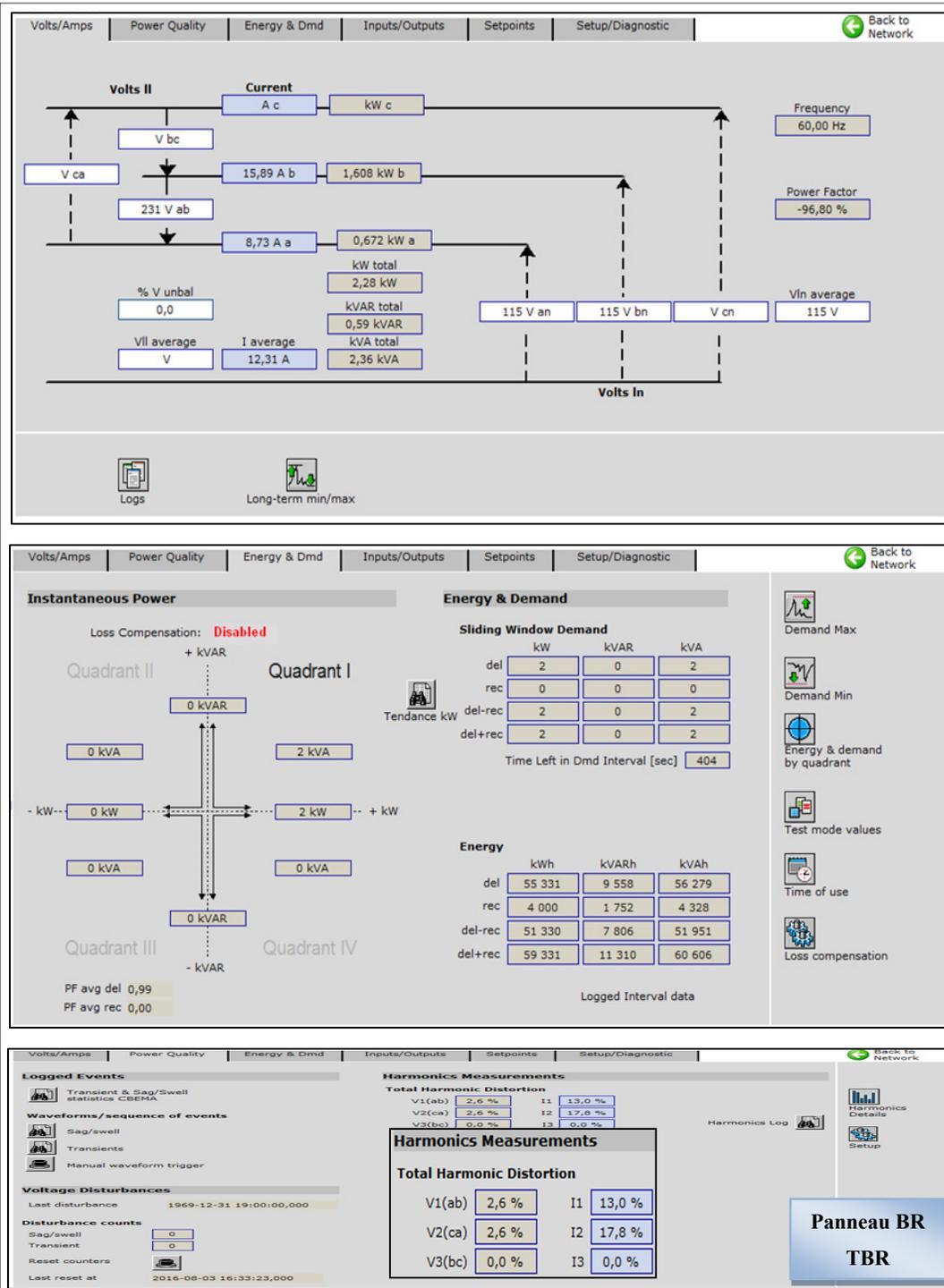


Figure 3.7 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du TBR

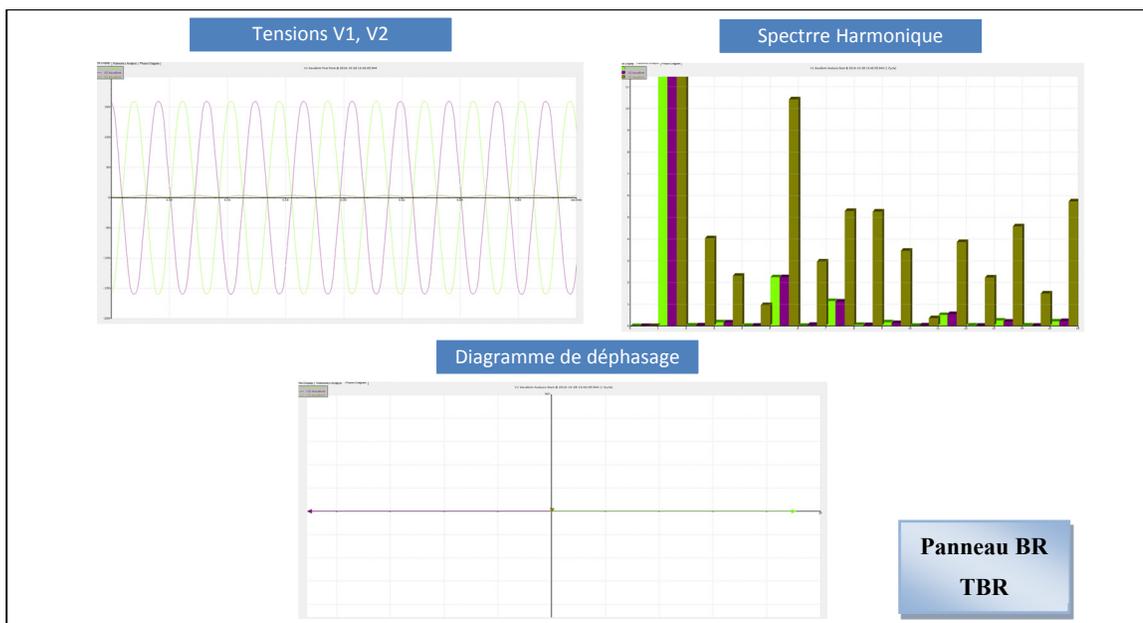


Figure 3.8 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1, V2 au niveau de la charge du Transformateur TBR

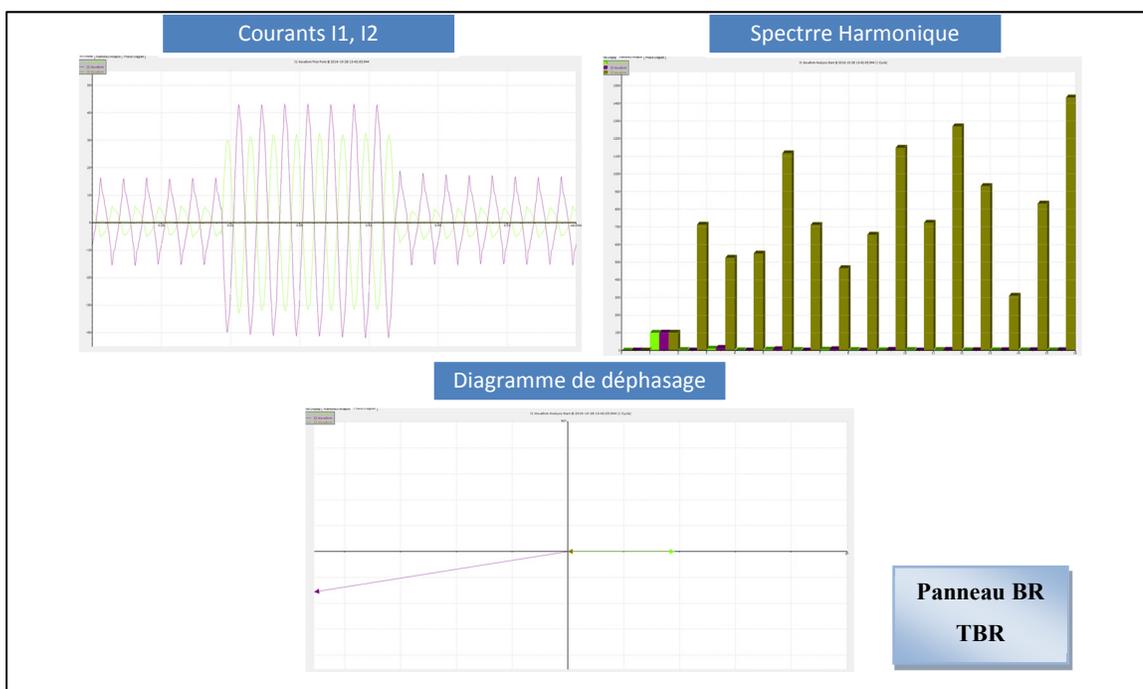


Figure 3.9 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1, I2 au niveau de la charge du Transformateur TBR

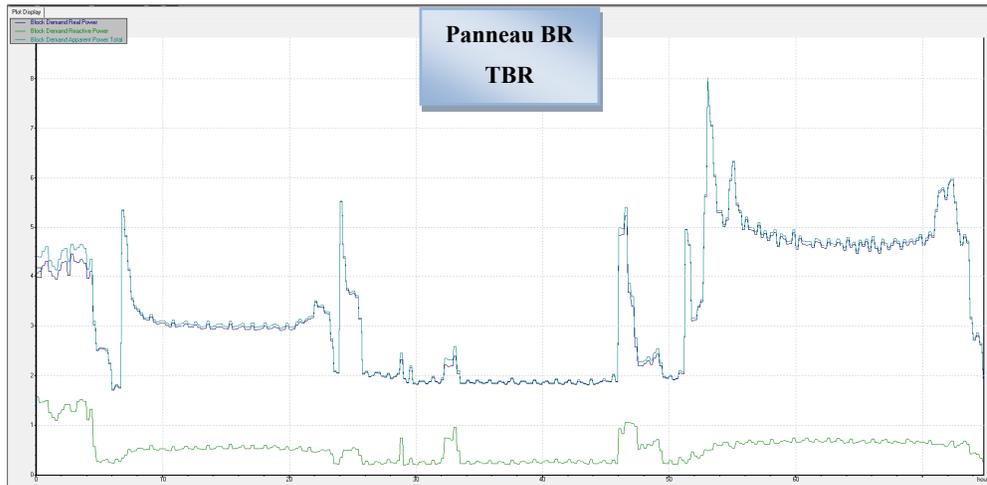


Figure 3.10 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du Transformateur TBR

Après avoir mesuré la charge totale du panneau BR alimenté par le transformateur TBR, nous sommes passés aux mesures de la charge totale d'un autre transformateur RC-TR-01 constituée de deux panneaux ; le panneau (1) et le panneau (3). Ces derniers sont présentés par la figure suivante :

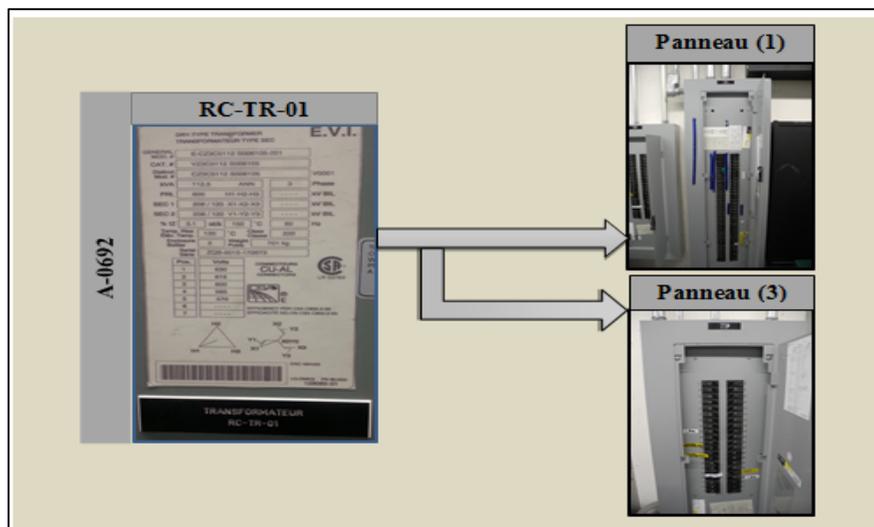


Figure 3.11 Charge alimentée par le transformateur RC-TR-01

Le transformateur RC-TR-01 est un transformateur dont le secondaire est couplé en zigzag. L'installation des transformateurs avec ce type de couplage vise d'un côté à éliminer les courants homopolaires qui peuvent circuler dans le primaire des transformateurs quel que soit leur type de couplage et d'un autre côté à réduire le déséquilibre des tensions au sein du réseau électrique de l'ÉTS.

Le transformateur RC-TR-01 alimente deux charges ; le panneau (1) qui alimente le débarcadère de la cuisine, le club étudiants localisé dans la salle A-0691, la salle A-0080, plusieurs prises électriques comme la prise téléviseur, les prises de la salle A-0658, les prises 681, 685, 684.1, 689 etc...

De plus, le panneau (1) alimente des panneaux de contrôle pour les ventilateurs d'évacuation VE-1A et VE-68, un ventilateur d'alimentation VA-26 localisée dans la salle A0727, deux moteurs 683 et 684, la salle télécom. 671 et le Lavabo et les prises de la salle de bain au rez-de-chaussée.

Quant au panneau (3), il alimente le positionneur et armoire de contrôle dans la salle A-0550, la salle A-0551 ainsi que le palan rotatif $\frac{1}{4}$ de tonne qui y est installé, la salle A-0554, un câble chauffant, un 16.2KW débarcadère, deux refroidisseur Coolmate installés dans la salle A-0550, une machine à polir, une tronçonneuse, deux fours à électrodes, trois contrôleurs SCOMPI dans la salle A-0550, une hotte, des prises meule et table.

Donc nous avons identifié toutes les charges alimentées par les deux panneaux (1) et (3) qui sont alimentés par le transformateur RC-TR-01 et nous allons présenter dans ce qui suit les mesures que nous avons obtenues aux bornes des deux panneaux.

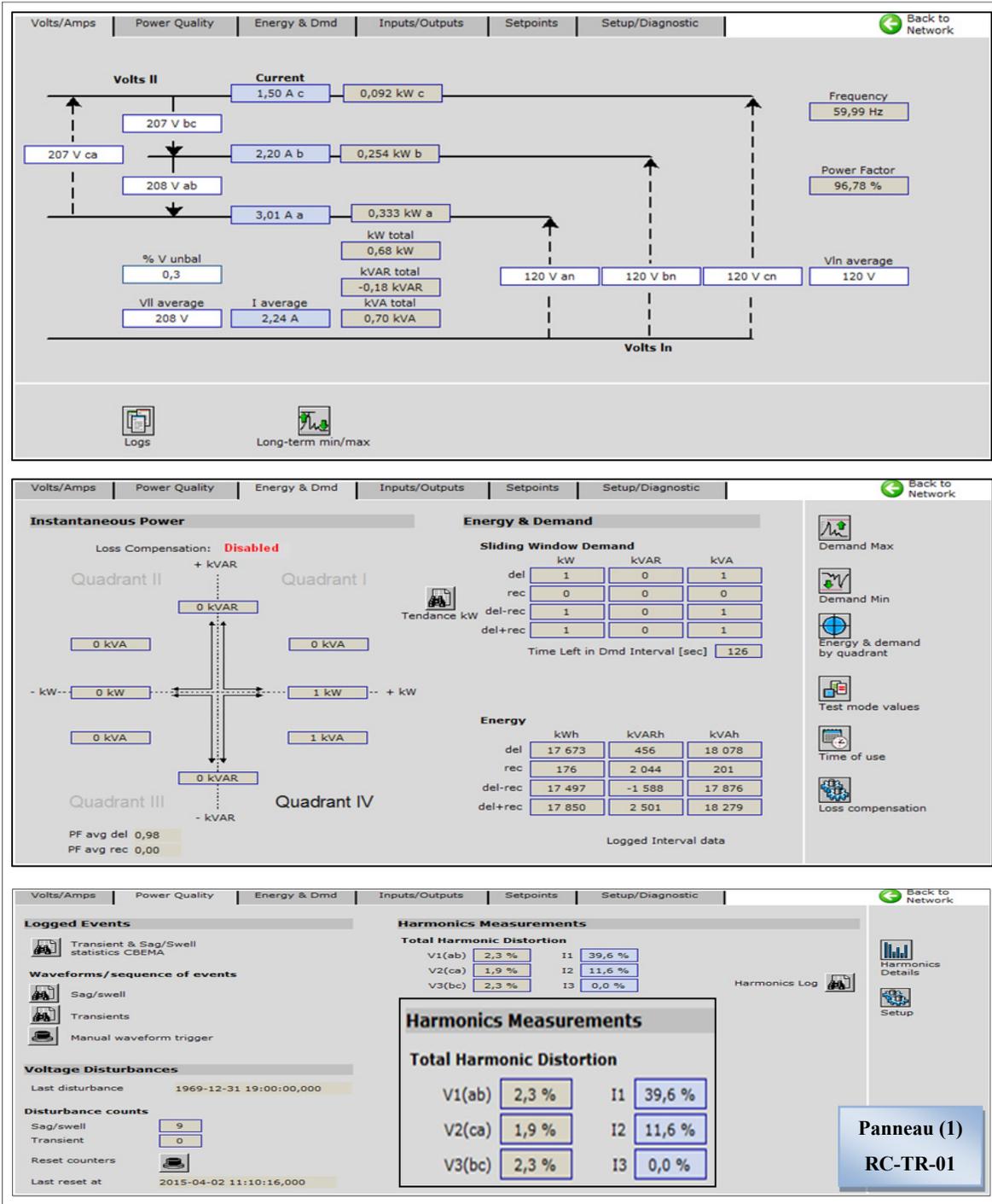


Figure 3.12 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (1) de RC-TR-01

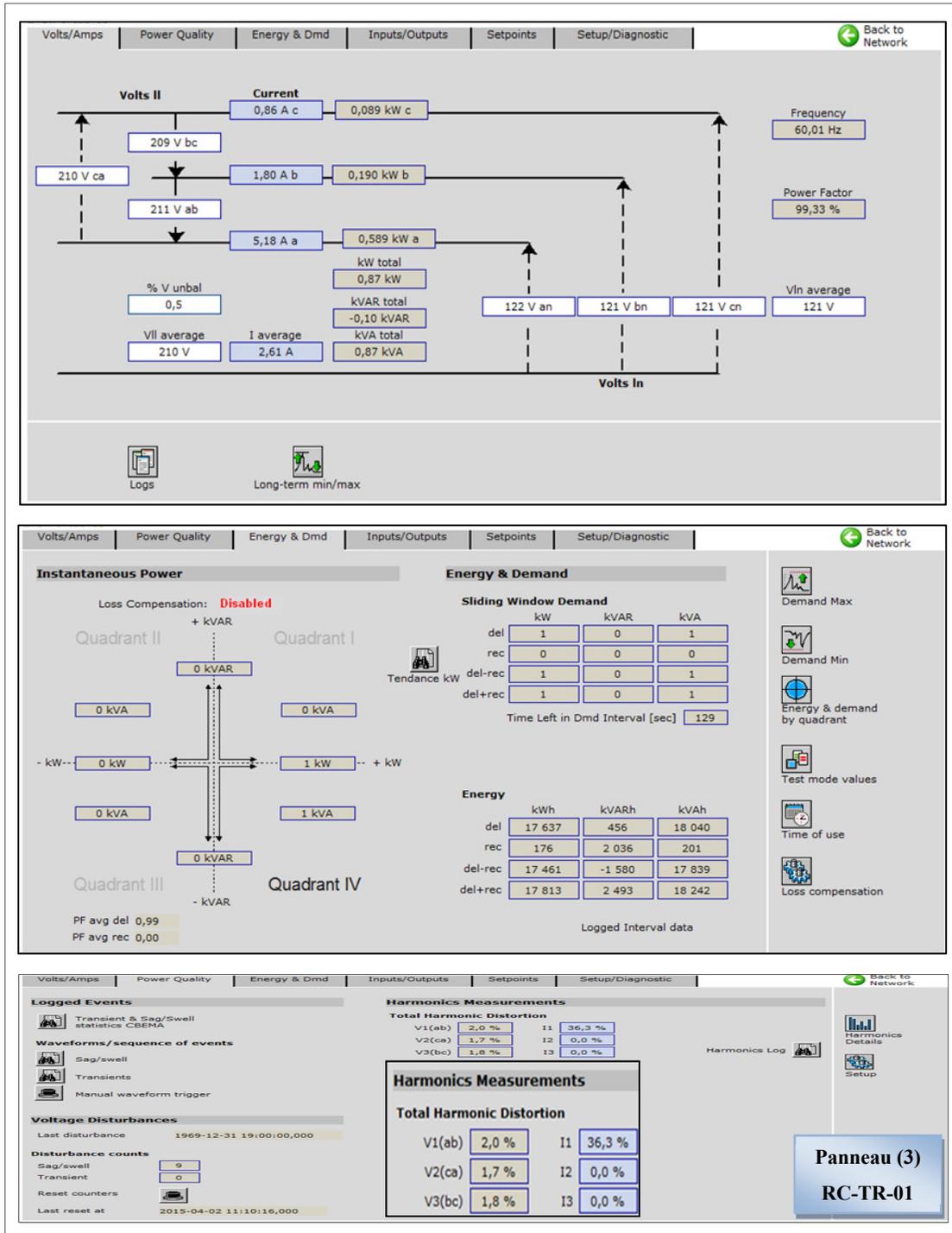


Figure 3.13 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (3) de RC-TR-01

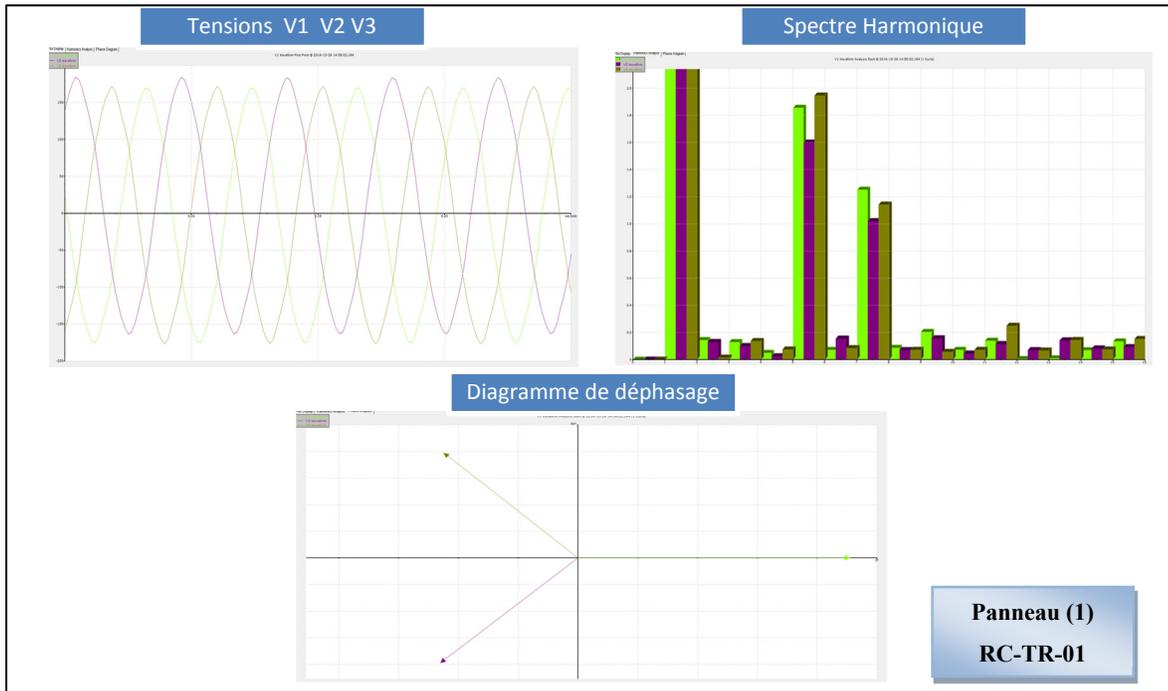


Figure 3.14 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (1) du Transfo RC-TR-01

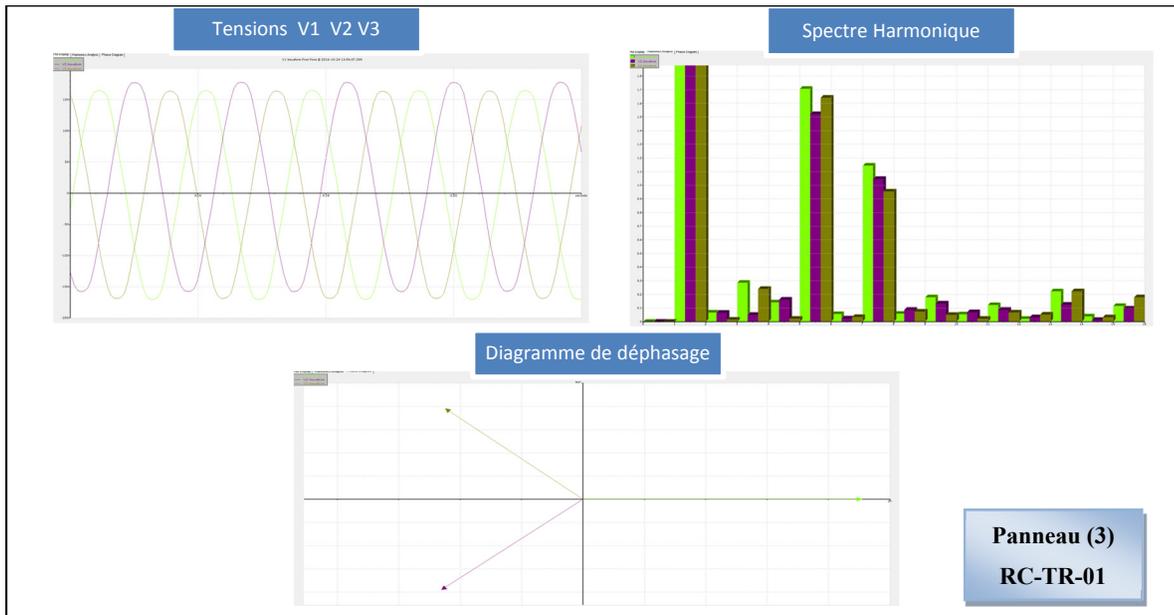


Figure 3.15 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (1) du Transfo RC-TR-01

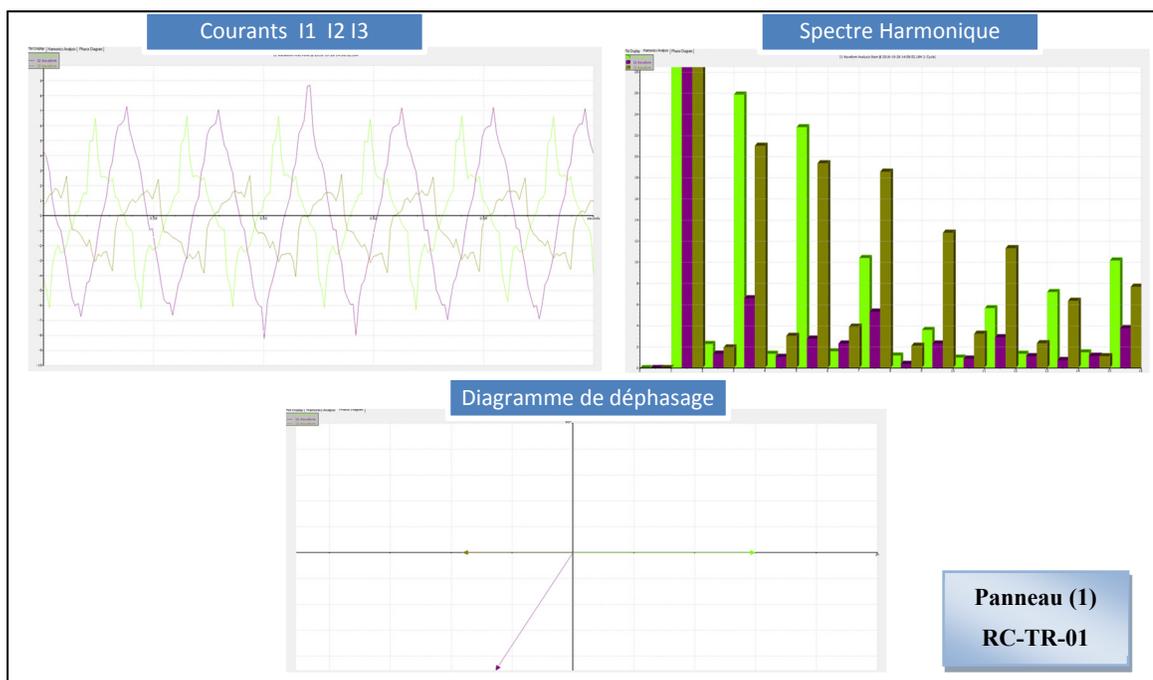


Figure 3.16 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (1) du Transfo RC-TR-01

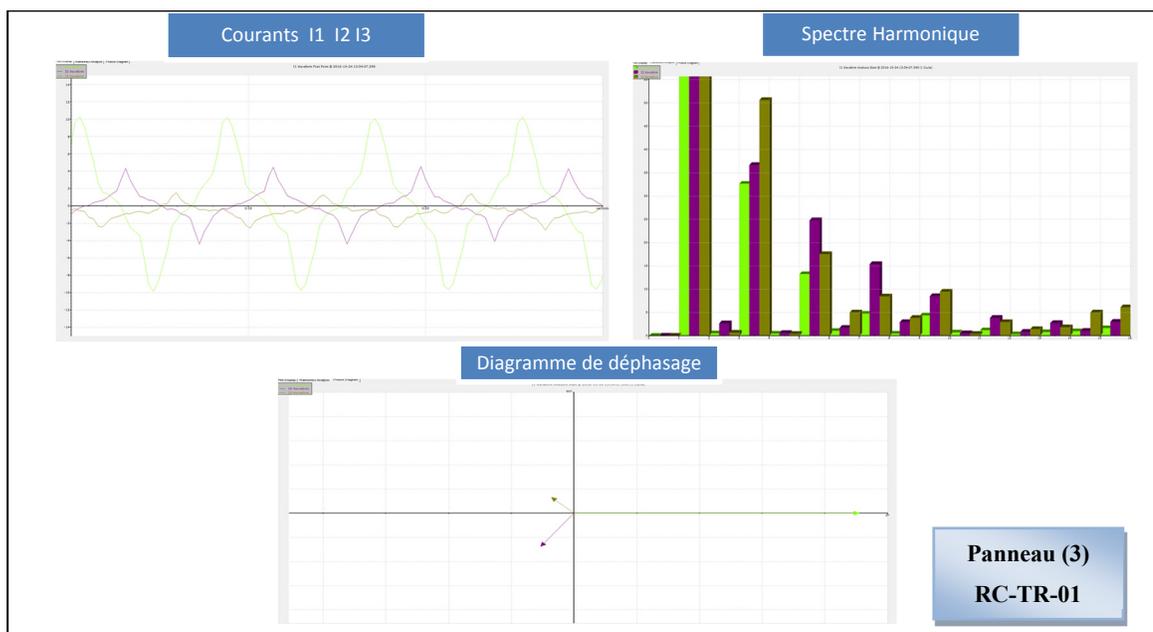


Figure 3.17 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (3) du Transfo RC-TR-01

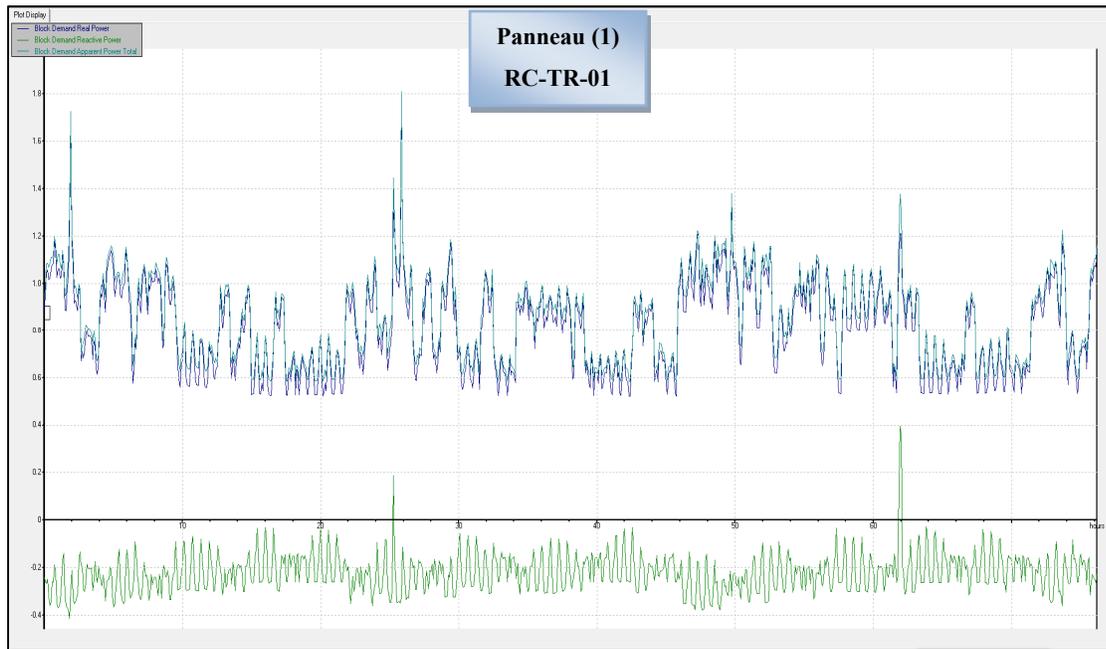


Figure 3.18 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau (1) du Transfo RC-TR-01

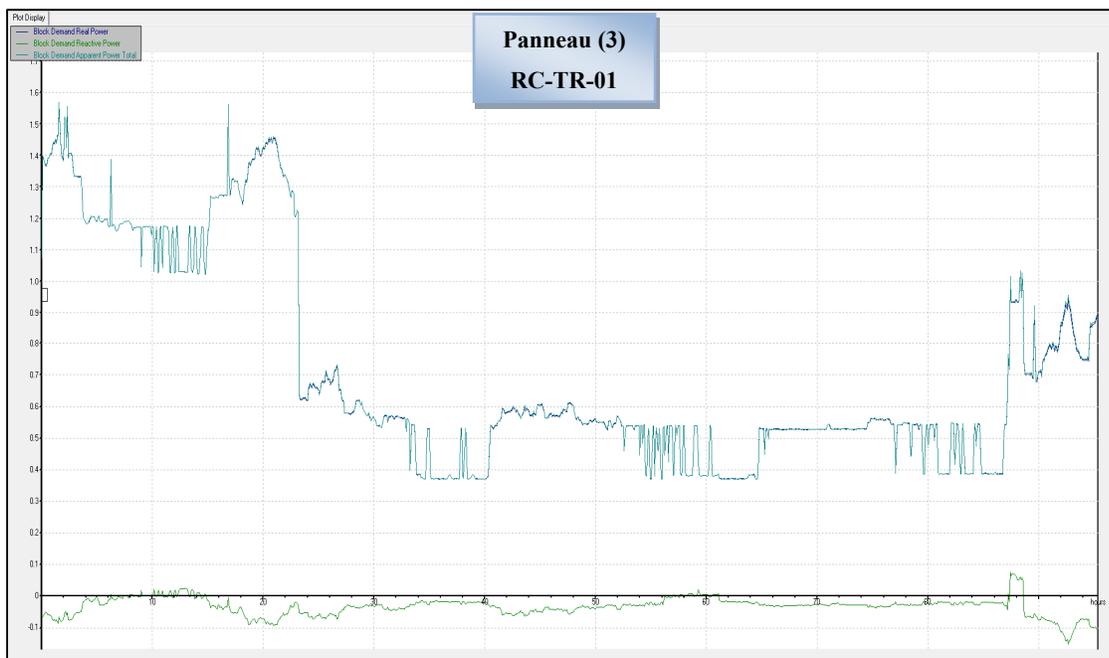


Figure 3.19 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau (3) du Transfo RC-TR-01

Dans le même local, un deuxième transformateur est installé qui est le RC-TR-02 et qui de son côté alimente le panneau (4). Ce dernier pris en photo, fournit de l'énergie à plusieurs charges telles que les fours Cleaveland, le four rational traiteur et la soupière de la cuisine.

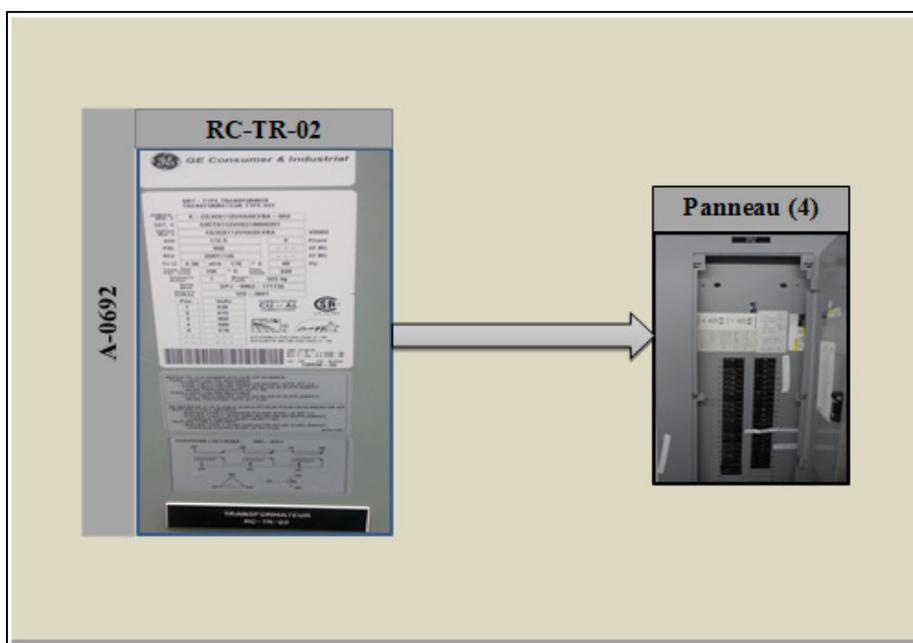


Figure 3.20 Charge alimentée par le transformateur RC-TR-02

Nous avons aussi connecté notre analyseur au panneau (4) et les mesures expérimentales ainsi obtenues sont comme suit :

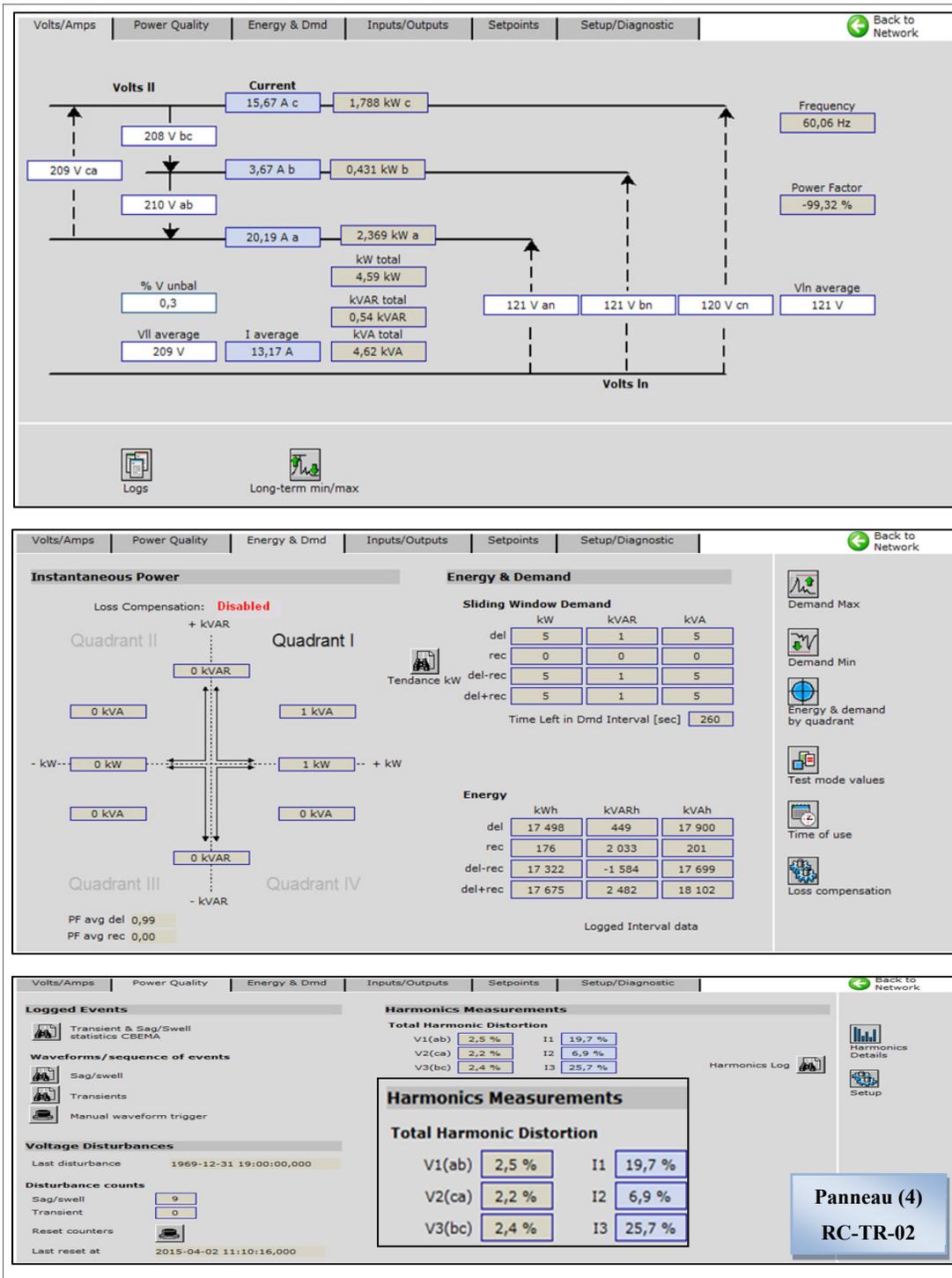


Figure 3.21 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (4) de RC-TR-02

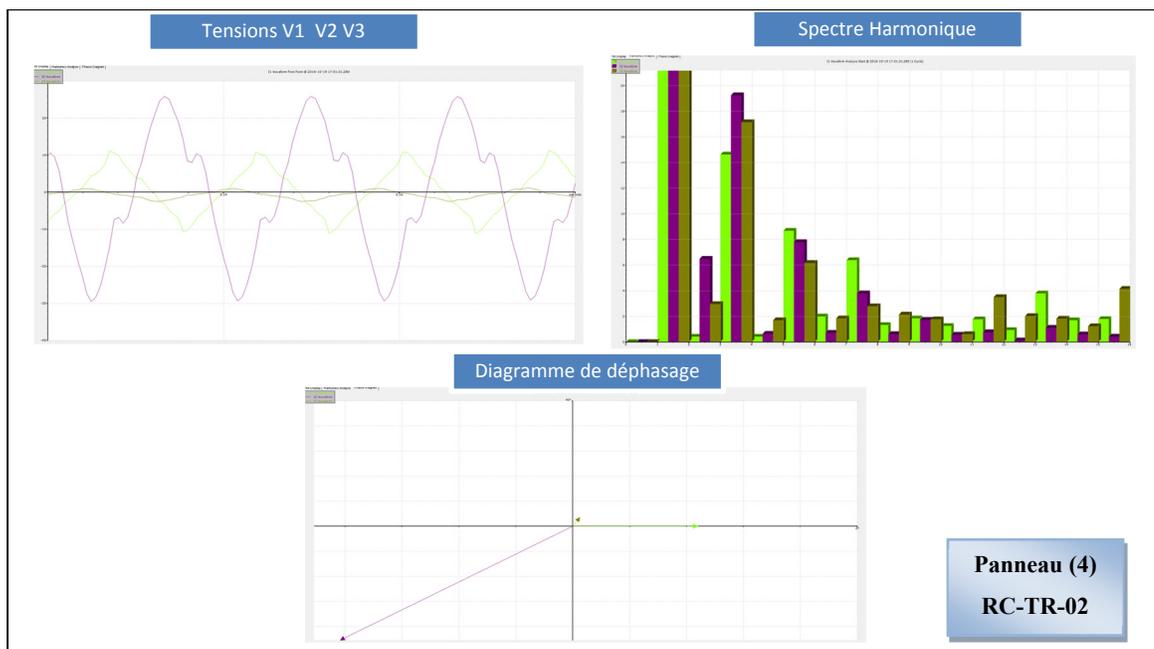


Figure 3.22 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (4) du Transfo RC-TR-02

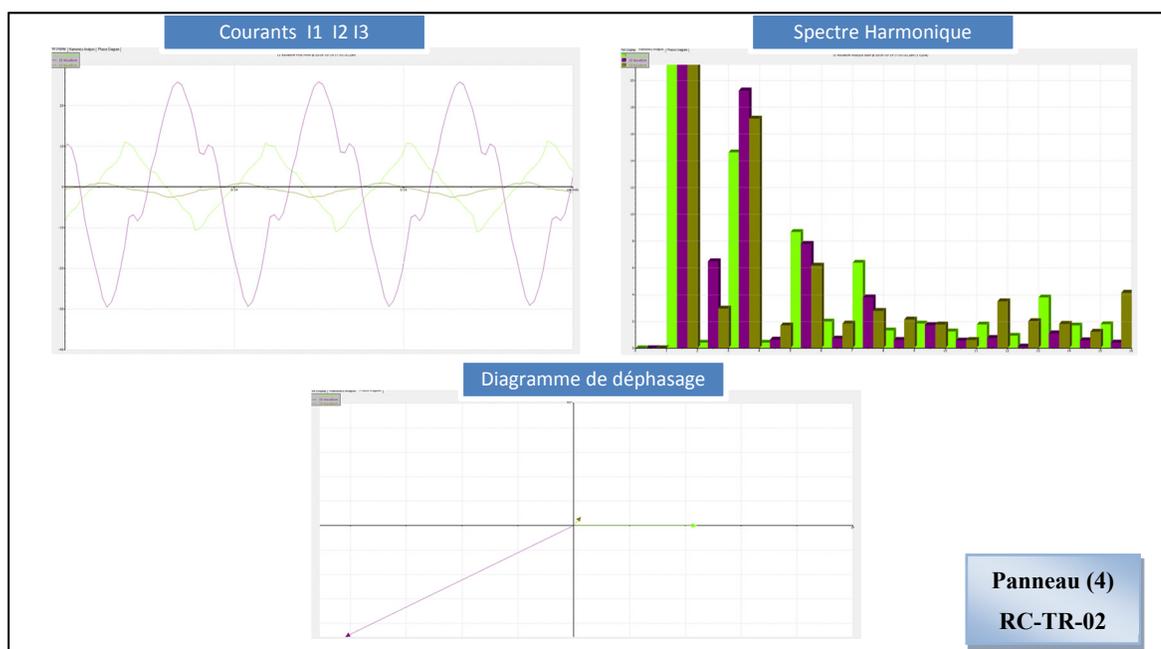


Figure 3.23 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (4) du Transfo RC-TR-02

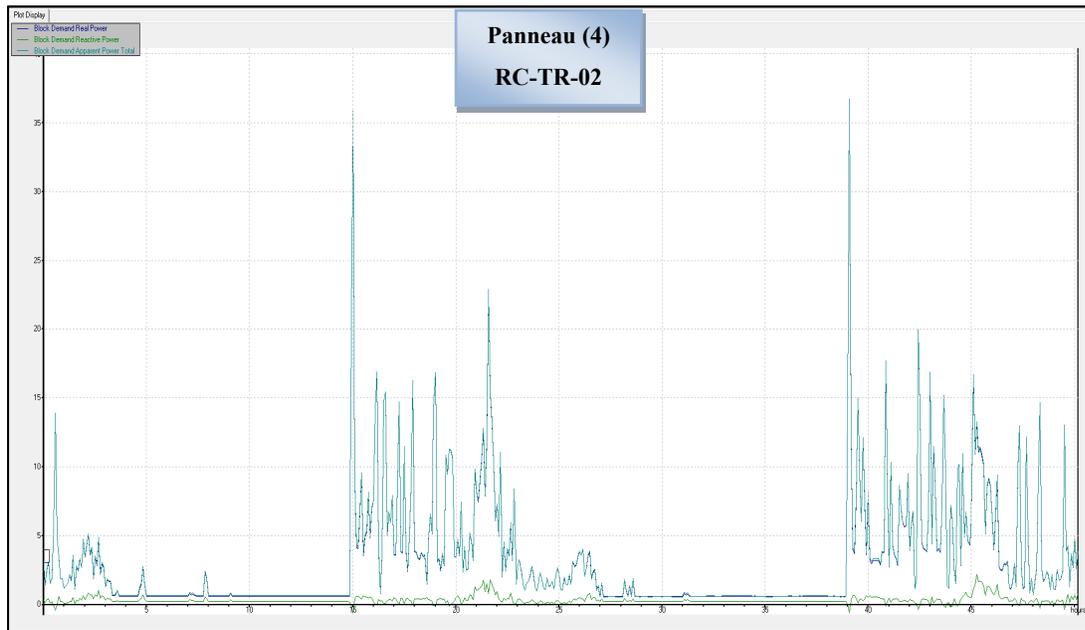


Figure 3.24 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau (4) du Transfo RC-TR-02

Nous passons par la suite au transformateur suivant qui est le TPPHR. Ce dernier est installé dans la salle A-0840, il possède une puissance apparente nominale égale à 112.5kVA. Comme le montre la figure 3.25, le transformateur TPPHR est connecté au panneau PPHR.



Figure 3.25 Charge alimentée par le transformateur TPPHR

Le panneau PPHR fournit de l'énergie pour tout événement du Hall sud et nord ainsi que pour la Boîte de répartition du vestiaire A-0705. D'un autre côté, il alimente cinq autres panneaux tels que NR, FR, GR, PR et BIS.

Ces panneaux alimentent la porte électrique de notre dame, une boîte de jonction libre trouvée dans le corridor du côté du local A-0941, l'abreuvoir, un panneau publicitaire, une prise mezz pour la photocopieuse, une prise pour l'écran du rez-de-chaussé, prises alimentant le Hall d'entrée. De plus, ces panneaux alimentent aussi beaucoup de prises au niveau du hall d'entrée principale du pavillons A, l'éclairage et la salle A-0135.

D'autre part, le panneau PPHR alimente aussi la salle A-S284, deux pompes de puisard PP-5 dans le local A-S262 et PP-2 dans le local A-S290, un ventilateur de transfert VT-6 du local A-S210, deux ventilateurs d'évacuation VE-29 et VE-30 installés respectivement dans les locaux A-S165 et A-S260 et pour finir des prises du couloir d'entrée entre les pavillons A et B, au sous sol 1 et au rez-de-chaussé et une autre à côté de la salle A-S290.

Il est possible maintenant de présenter les résultats des mesures réalisées au niveau du panneau PPHR; ainsi, dans la suite de ce paragraphe, les figures 3.26, 3.27, 3.28 et 3.29 présenteront les résultats expérimentaux des mesures effectuées aux bornes de ce panneau pour avoir le profil de sa charge en temps réel.

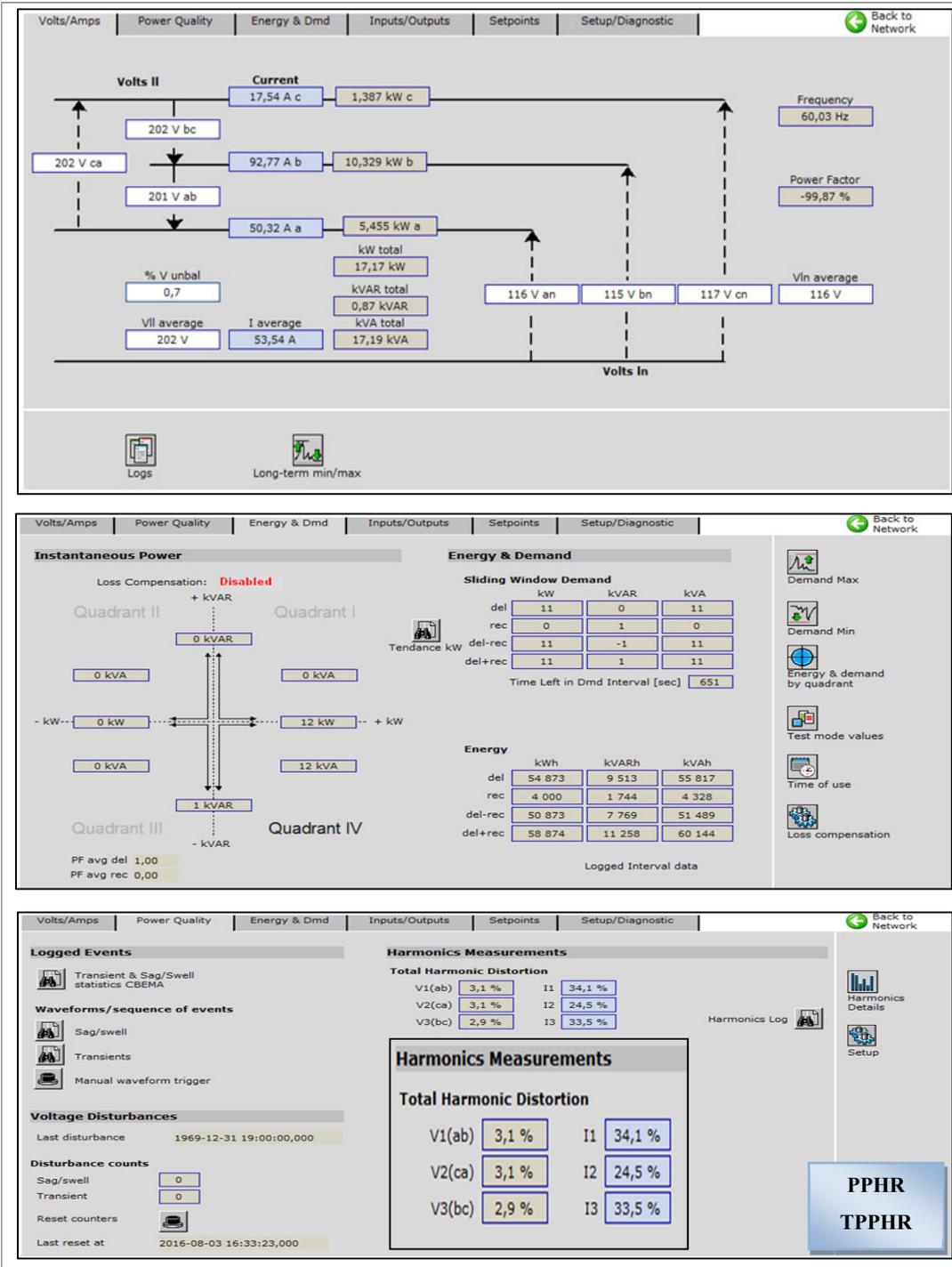


Figure 3.26 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPHR de TPPHR

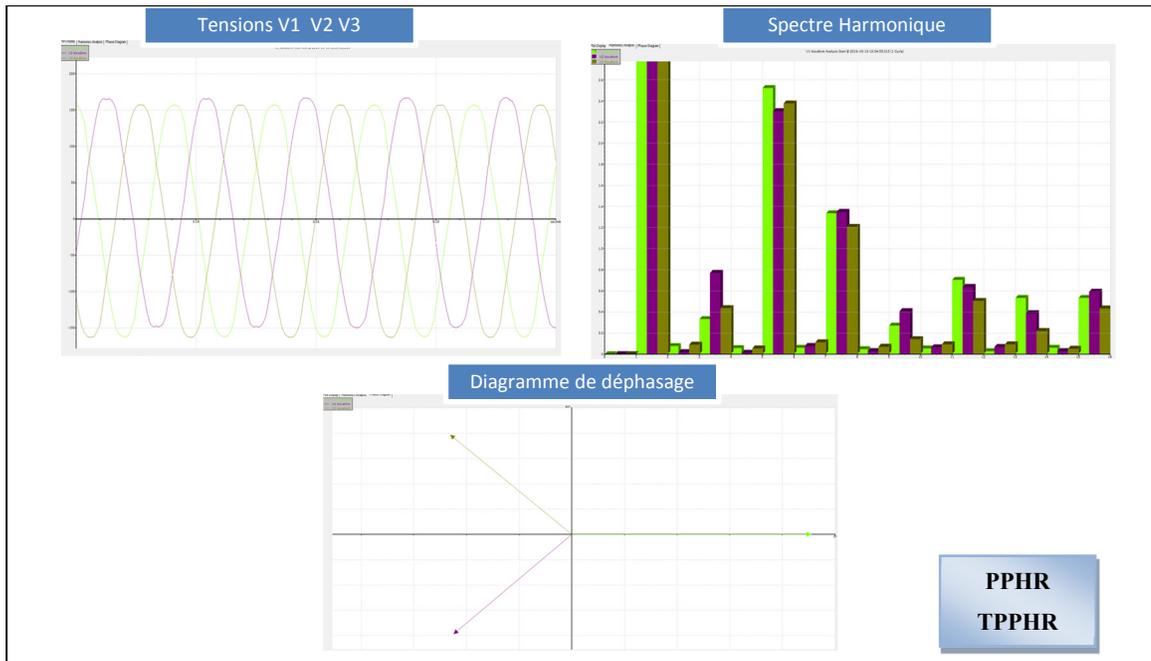


Figure 3.27 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPHR du Transfo TPPHR

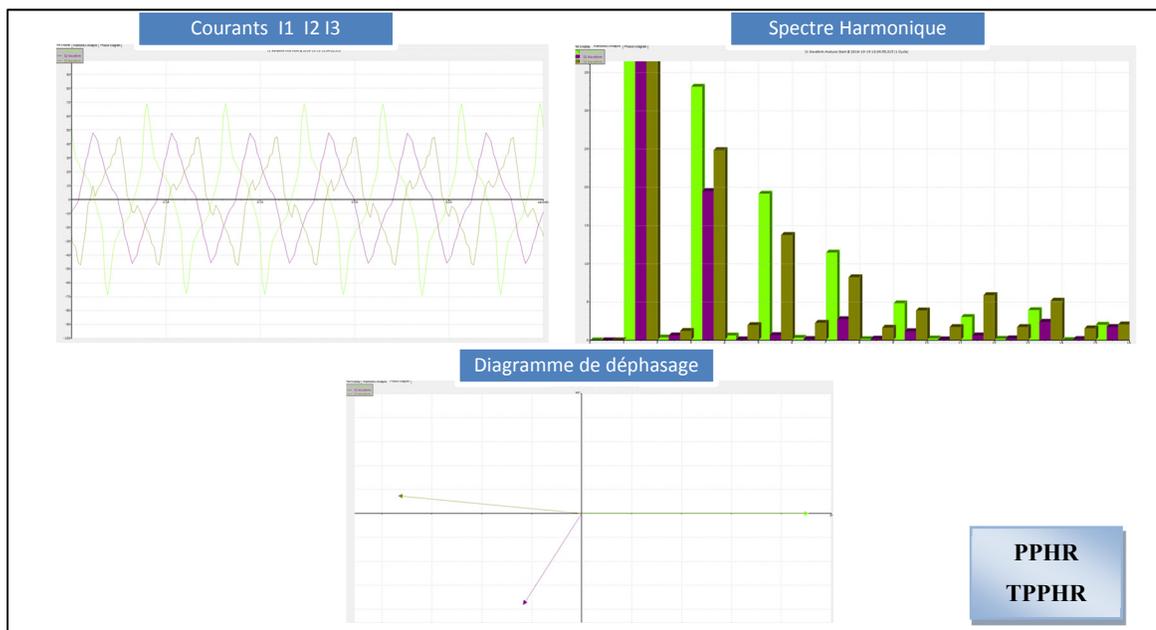


Figure 3.28 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPHR du Transfo TPPHR

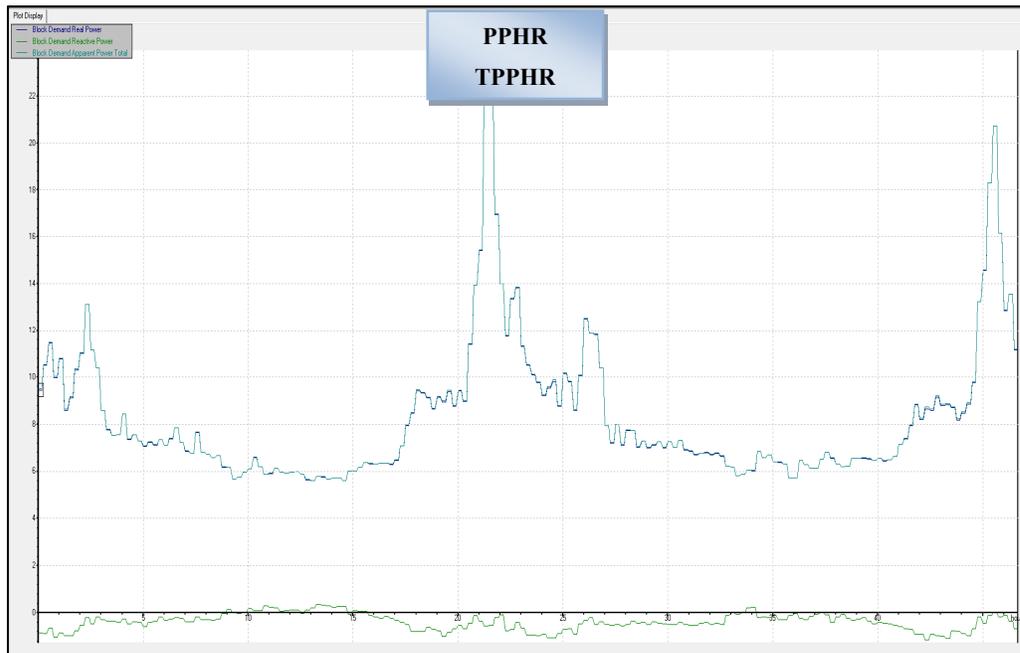


Figure 3.29 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau PPHR connecté au Transfo TPPHR

Avant de passer aux mesures des transformateurs installés au premier étage, nous clôturons les mesures des charges alimentées par les transformateurs installés au rez-de-chaussée par le panneau PP1R connecté au transformateur TPP1R comme le montre la figure 3.30.

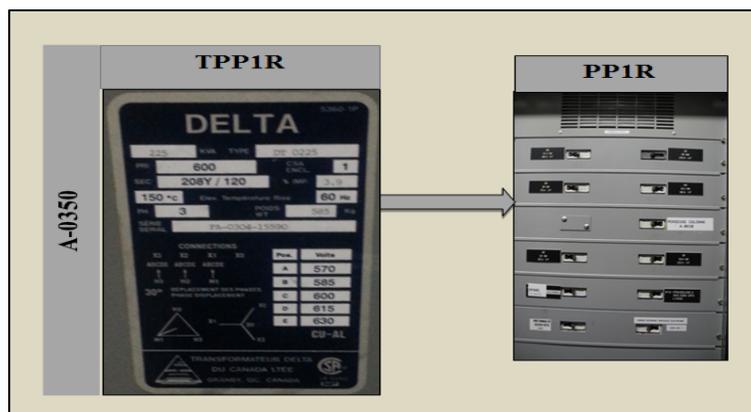


Figure 3.30 Charge alimentée par le transformateur TPP1R

Comme nous pouvons le voir, le transformateur TPP1R ainsi que le panneau PP1R sont installés dans la salle A-0450. Le panneau PP1R est connecté à plusieurs autres charges comme d'autres panneaux qui sont AR, SR, AIS, MA, CR, DR et ER mais aussi une perceuse colonne localisée dans A-0650 et une fraiseuse 5 présente dans L-0656. De plus, ce qui est assez intéressant pour la suite de notre étude c'est que le panneau PP1R alimente des bornes de recharge pour les véhicules électriques et qui sont installés au sous-sol 1 du pavillon A.

Par défaut de mesures, nous étions capables de mesurer uniquement les valeurs des puissances actives, réactives et apparentes que consomme le panneau PP1R chaque cinq minutes ce qui a permis d'obtenir le profil de puissances suivant :

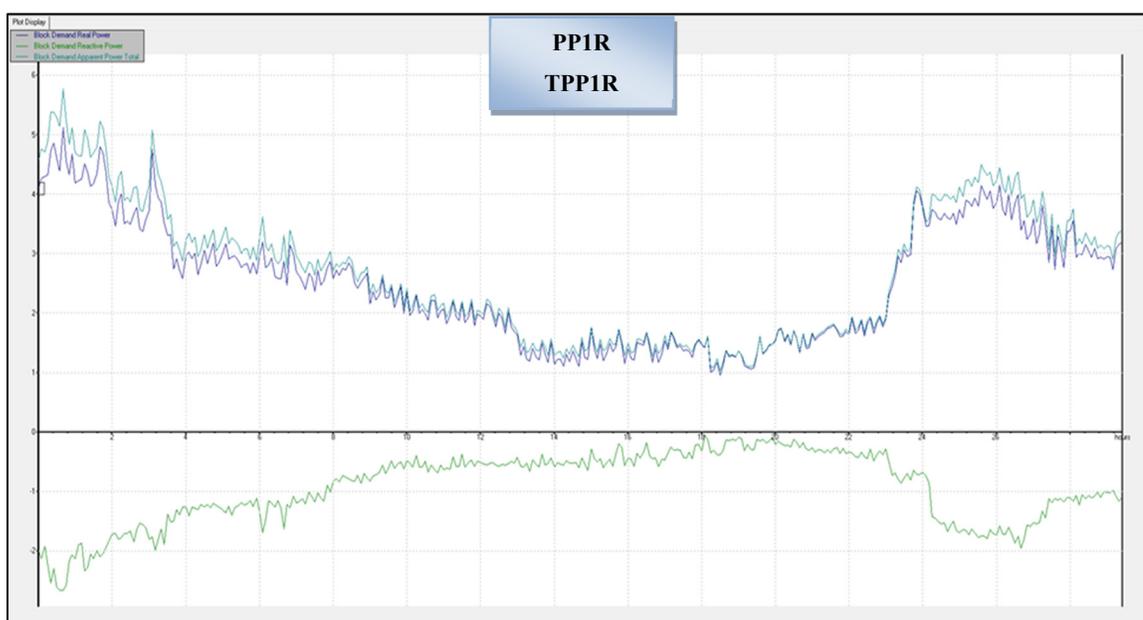


Figure 3.31 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau PPHR connecté au Transfo TPPHR

Nous entamons maintenant les mesures en temps réel des différentes charges alimentées par les transformateurs qui sont installés au 2^{ème} étage du pavillon A ; le premier transformateur dont nous avons mesuré la charge est le transfo TPPA1 qui est localisé dans la salle A-1362.

Ce transformateur alimente le panneau PPA1 qui est installé dans la même salle A-1362 et qui alimente à son tour trois autres panneaux ; A1 D1 et C1.

Le panneau A1 alimente un lave-vaisselle, les salles A-1518, A-1402, A-1406.1, A-1406.2, A-1406.3, A-1406.5, les breakers 54, 56, et 58 pour le nouveau broyeur installé dans la salle A-1508 et l'entrée de cette dernière.

Pour le panneau D1, il alimente les salles A-1226, A-1220, A-1260, A-1214, A-1222, A-1230 et les prises qui y sont installées. Les autres prises électriques sont installées dans les salles A-1212, A-1214, A-1226, dans les toilettes A-1322 et A-1324. Il alimente aussi des écrans aux plafonds dans les salles A-1226, A-1214 et A-1222.

Quant au panneau C1, il alimente aussi de son côté autres prises des salles A-1226, A-1220, A-1214, A-1222, A-1230, A-1212 et A-1172. De plus, il alimente les serveurs dans la salle A-1200 et les prises au plafond pour les écrans installés dans la salle A-1211 ainsi que les écrans LCD dans A-1212.

Ce transformateur TPPA1 et le panneau PPA1 qu'il alimente sont présentés par la figure 3.32.

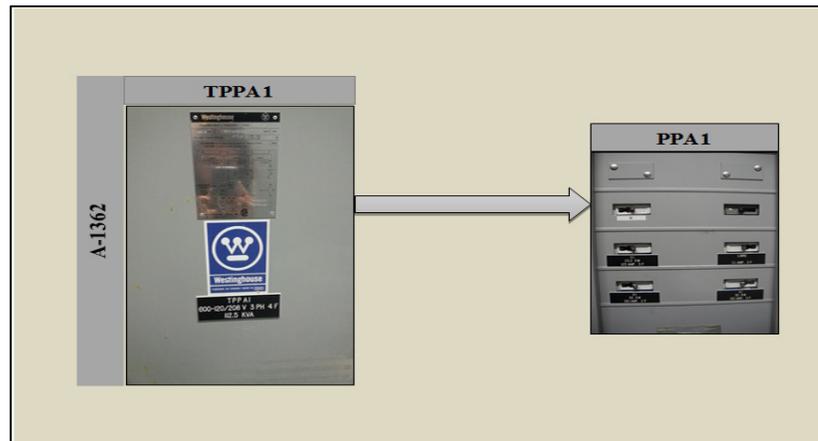


Figure 3.32 Charge alimentée par le transformateur TPPA1

Avant de procéder à la présentation des résultats de mesures de la charge du panneau PPA1, alimenté par le transformateur TPPA1, il est important de mentionner que toutes les mesures que nous allons présenter des courants, puissances actives, réactives et apparentes doivent être multipliées par le facteur deux. En effet, quand nous avons essayé de brancher les pinces de mesures autour des câbles des trois phases entrantes vers le panneau, il était impossible de le faire autour des deux câbles que comporte chaque phase à cause de leurs grandes grosseurs, ce qui nous a poussé à effectuer les mesures d'un seul câble par phase et de multiplier les valeurs obtenues par le facteur deux.

Par contre nous étions capables de reprendre les mesures en temps réel des puissances actives, réactives et apparentes et de les transférer sur MATLAB tout en les multipliant par le facteur deux ce qui nous a permis de voir l'évolution du profil de puissance de l'intégralité de la charge du panneau PPA1.

À ce niveau, nous allons nous contenter de présenter les résultats obtenus par Vista Powerlogic qui sont ceux que nous pouvons voir sur les figures 3.33, 3.34, 3.35 et 3.36.

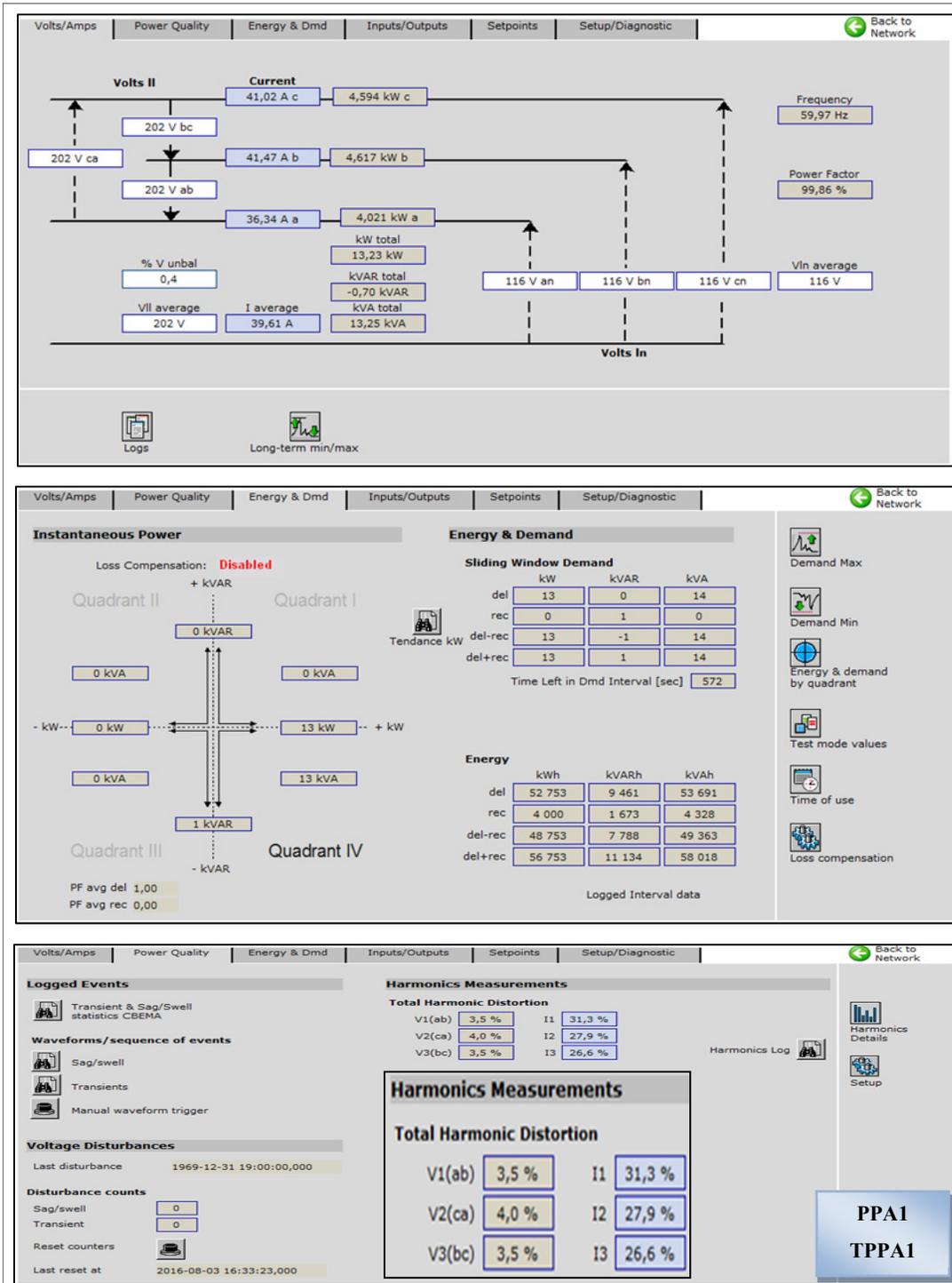


Figure 3.33 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPHR de TPPHR

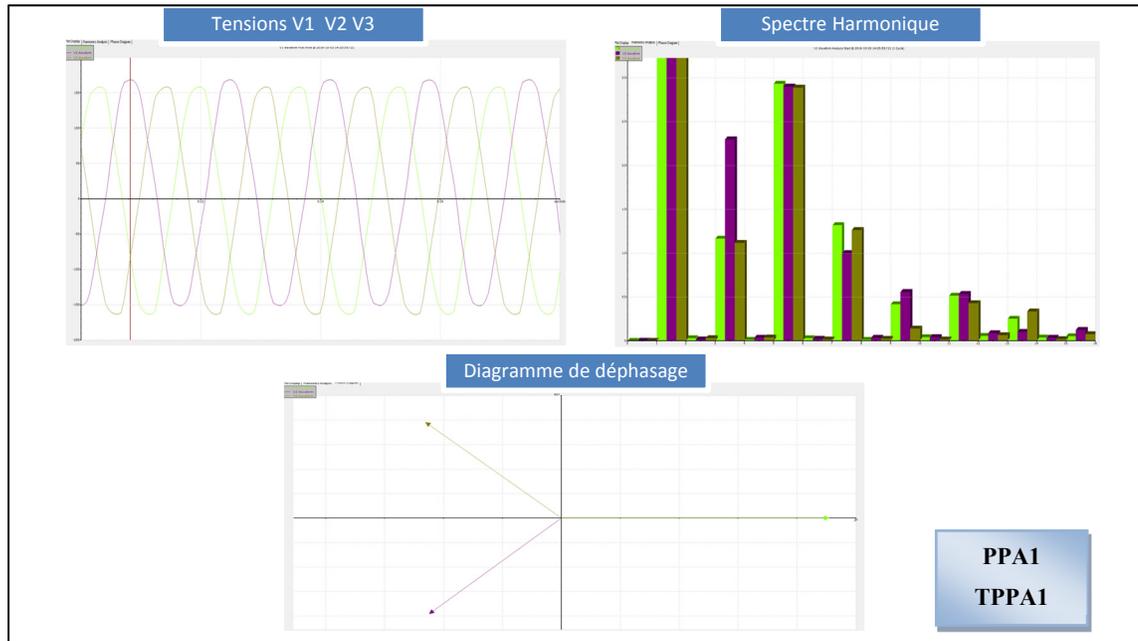


Figure 3.34 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPA1 du Transfo TPPA1

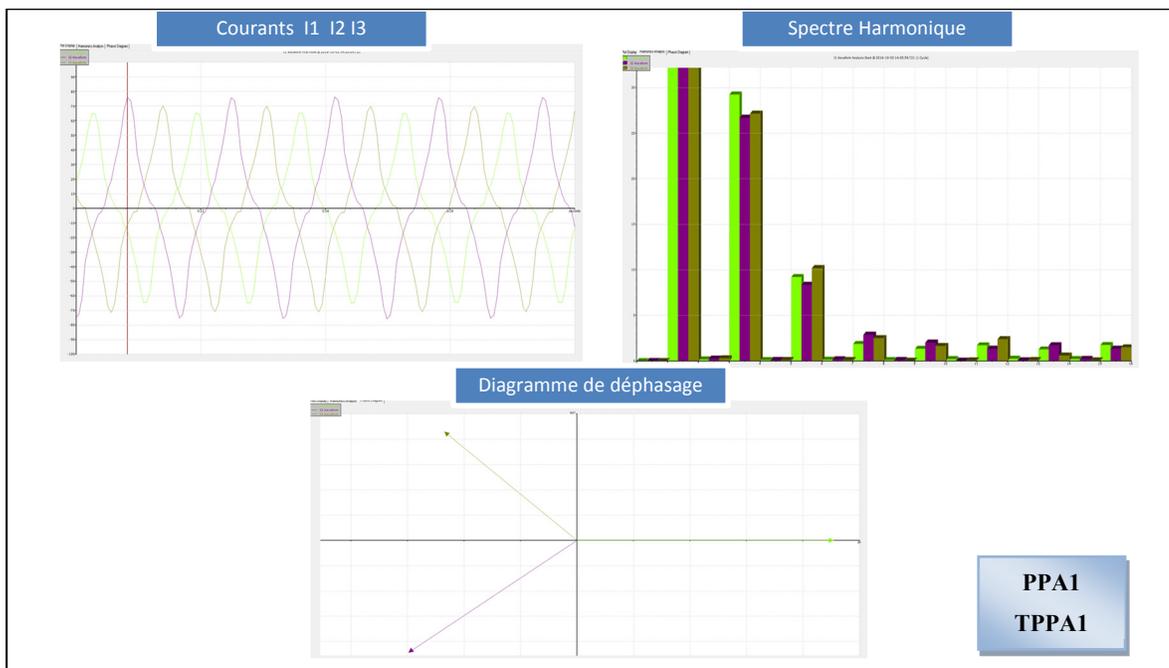


Figure 3.35 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPA1 du Transfo TPPA1

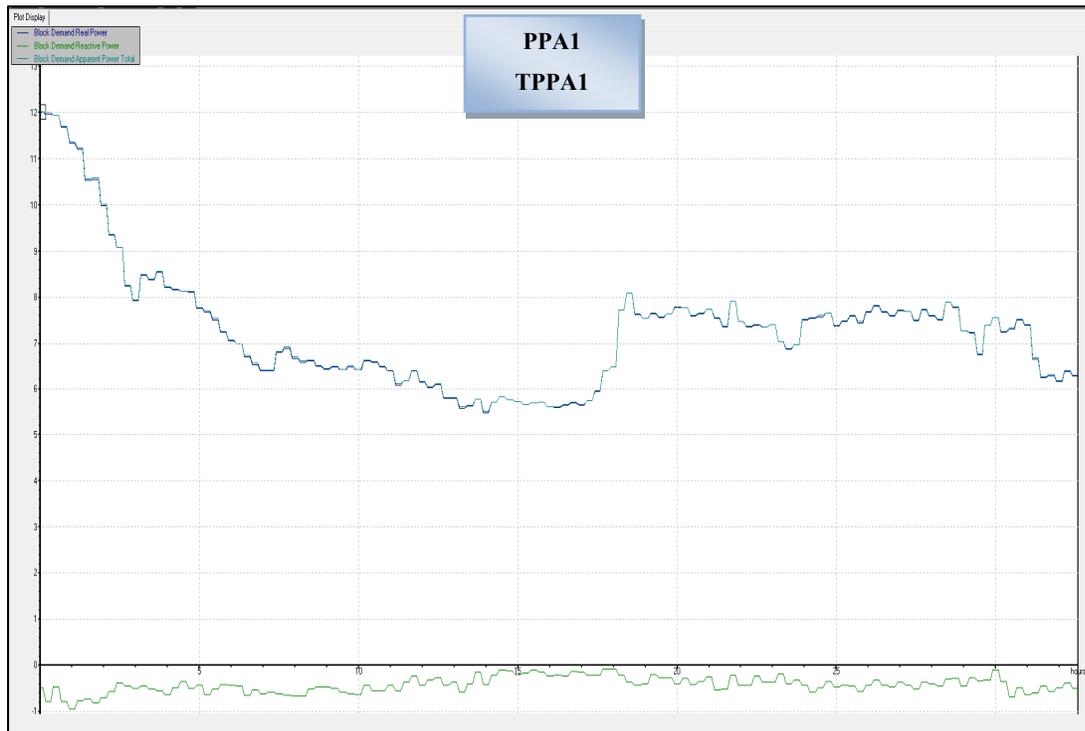


Figure 3.36 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du PPA1 du Transfo TPPA1

De plus, dans la même salle où nous avons mesuré le transformateur TPPA1, il y a un deuxième transformateur de 112.5kVA et que nous avons nommé T2-A-1362 puisqu'il n'avait pas de Tag. Cependant la charge connectée à ce transformateur n'est pas en marche.

Donc, nous n'étions pas capables d'effectuer les mesures en temps réel de la charge alimentée par le T2-A-1362. Par contre nous avons pu prélever les caractéristiques de la plaque signalétique de celui-ci ainsi que le type de charge qu'il alimente qui est le step installé dans la petite chambre électrique localisée dans la salle A-1508.1, ce que nous pouvons voir sur la figure 3.37.

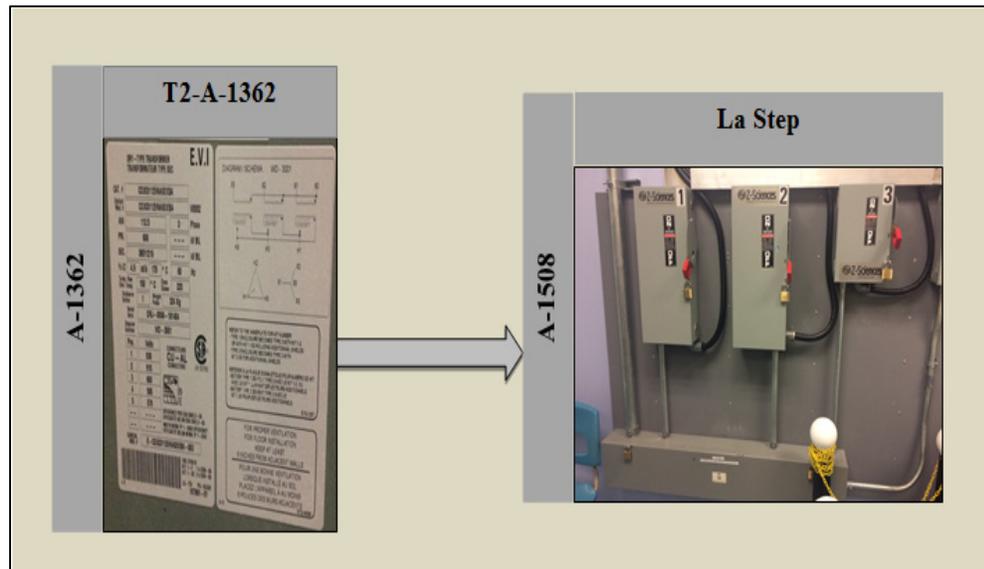


Figure 3.37 Transformateur T2-A-1362 et la charge qu'il alimente

Dans cette même salle où est installée le step, c'est-à-dire A-1508.1, un autre transformateur nommé TBI est installée du côté de l'entrée de la salle pour être précise. En effet, c'est un transformateur monophasé qui alimente un panneau d'à côté qui est le panneau PBI comme le montre la figure 3.38 :



Figure 3.38 Charge alimentée par le transformateur TBI

Ce panneau BI, alimente à son tour plusieurs locaux tels que ; A-1400, A-1402, A-1406, A-1406.5, 1406.4, A-1512, A-1518 et A-8656. De plus, il alimente l'ancien distributeur d'eau, l'étuve dans la salle A-1400, ainsi que le panneau J1. Ce dernier alimente de son côté l'ilot du fond, du centre et près de la porte de la salle A-1512, la salle A-1518 et les prises de la salle A-1250 comme les prises 15/20A.

Les mesures en temps réel de la charge du panneau BI sont données ci-dessous :

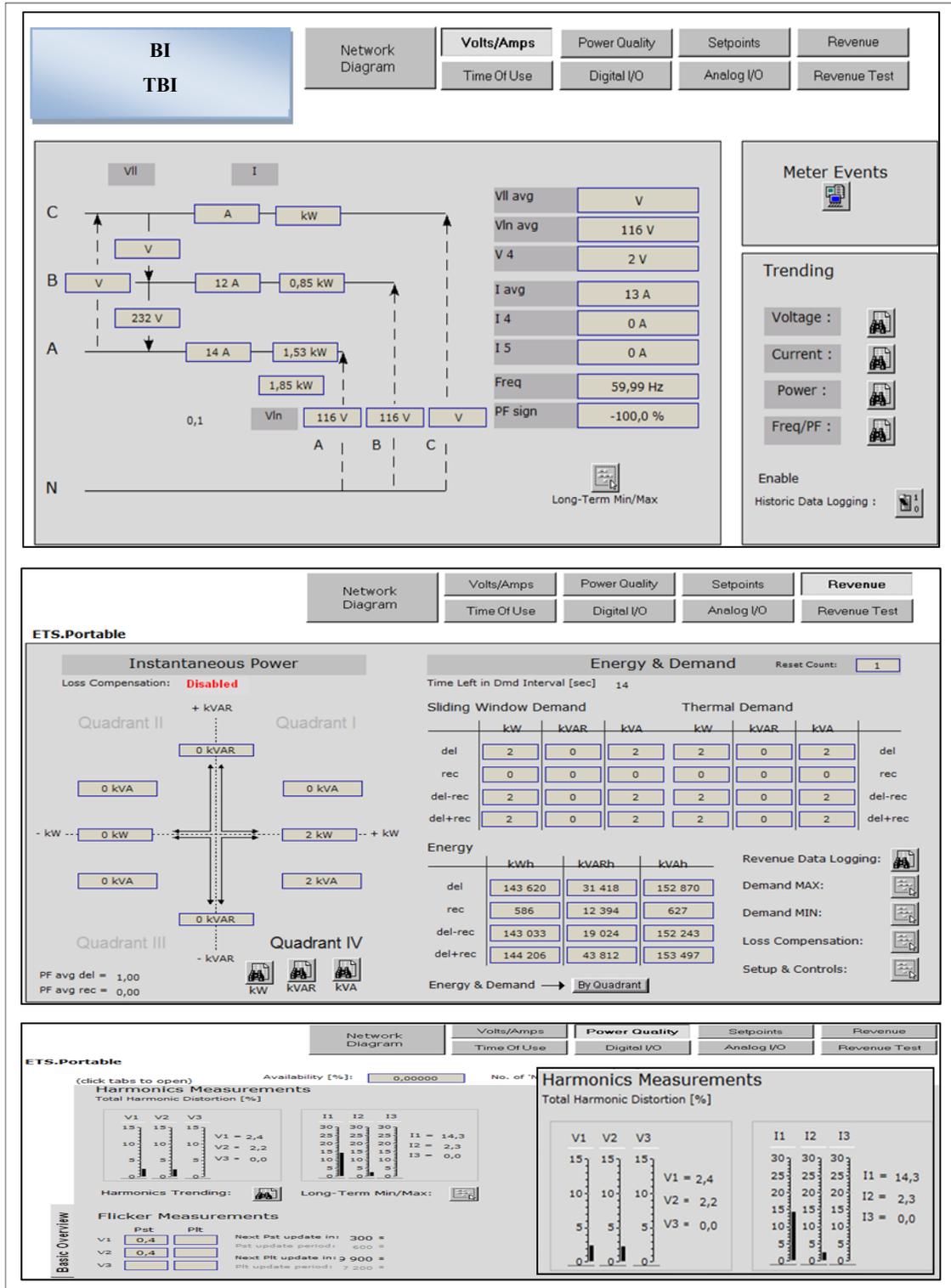


Figure 3.39 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau BI alimenté par TBI

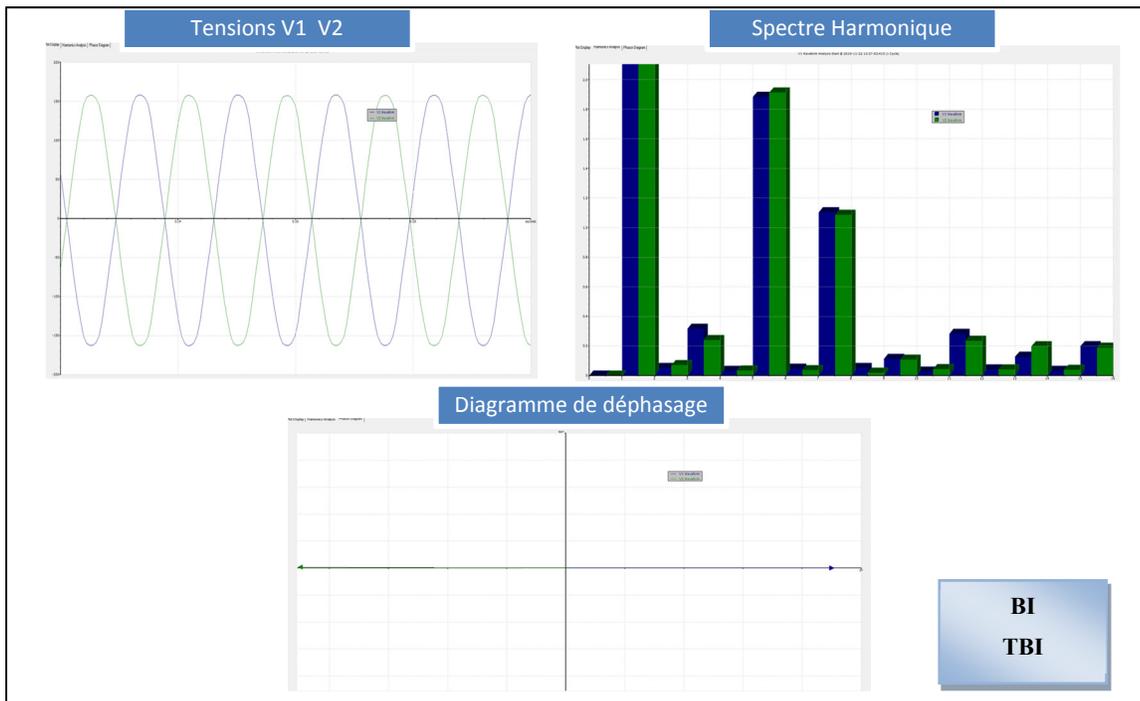


Figure 3.40 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 au niveau de la charge du panneau BI du Transfo TBI

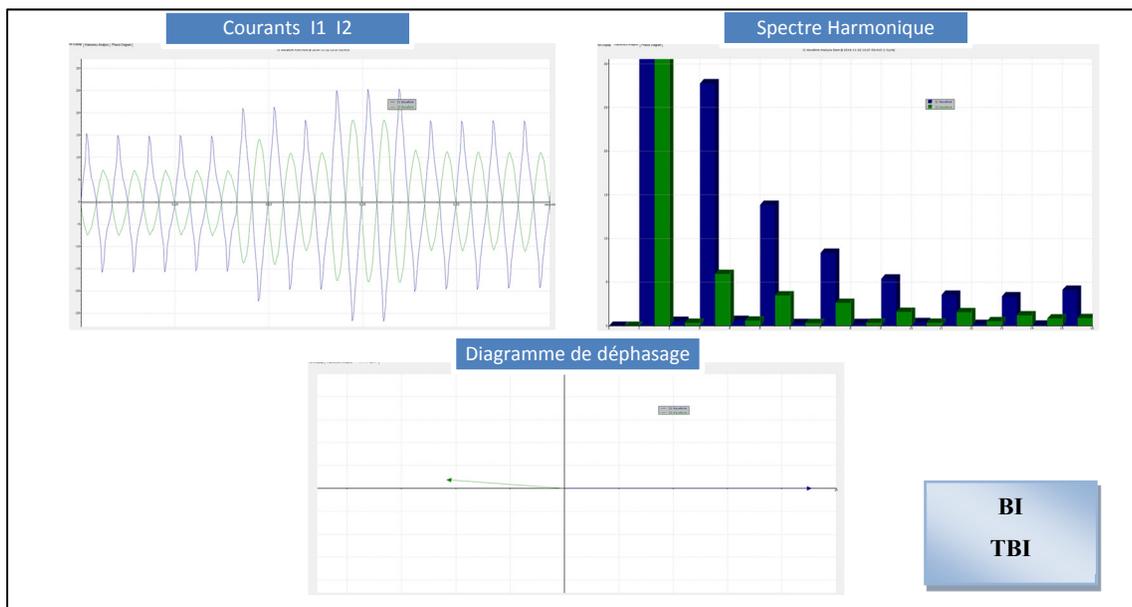


Figure 3.41 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 au niveau de la charge du panneau BI du Transfo TBI

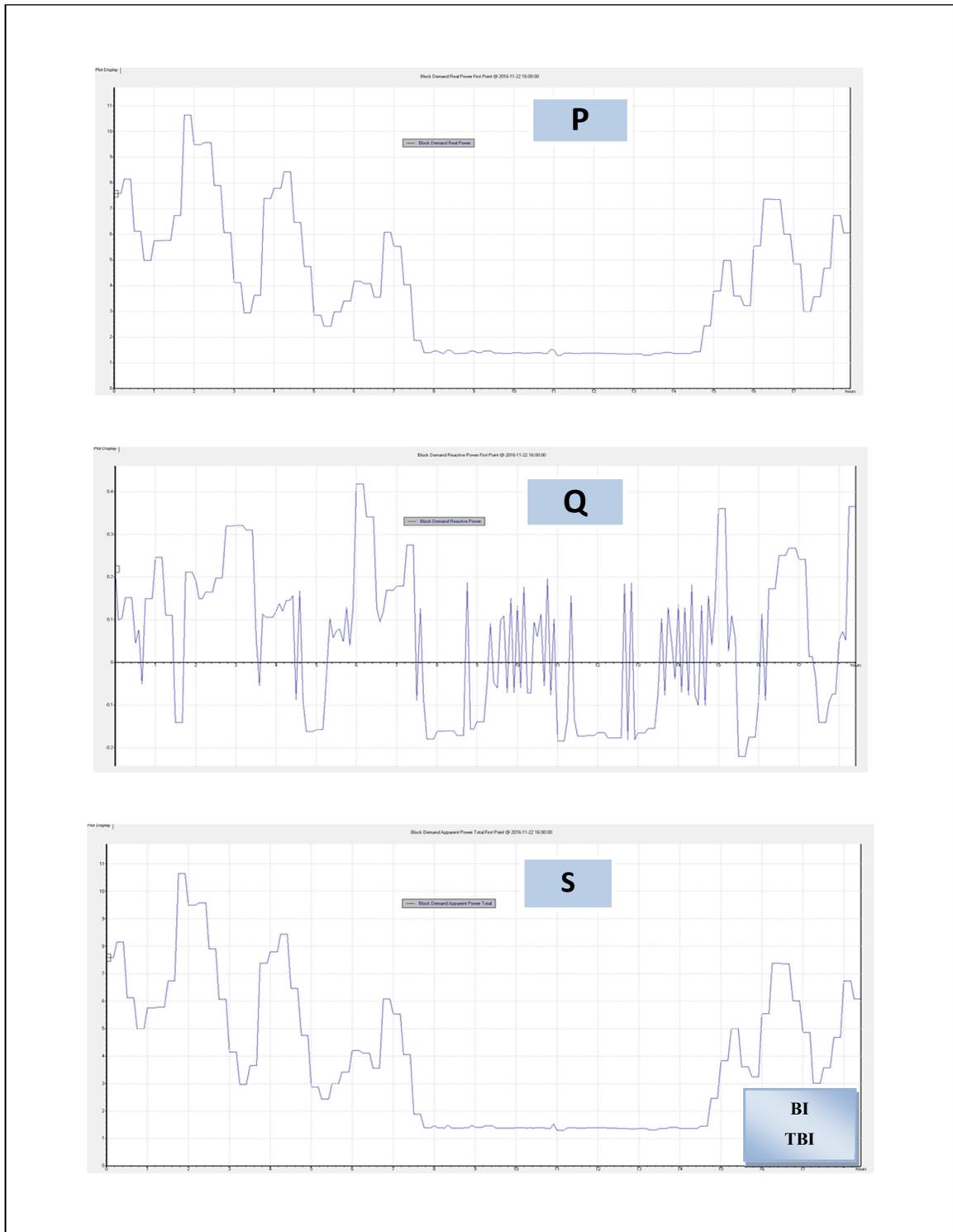


Figure 3.42 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau BI alimenté par le Transfo TBI

Par la suite, nous continuons les mesures avec un transformateur dont le couplage du secondaire est de type zigzag. Ce transformateur nommé 01-TR-01 ou T-A-1531 possède deux sorties connectées aux deux panneaux qui sont le panneau (305) installé dans la même salle et le panneau (306) installé au deuxième étage dans la salle A-2538 qui est juste au-dessus de la salle A-1531. Cette connexion est montrée par la figure 3.43.

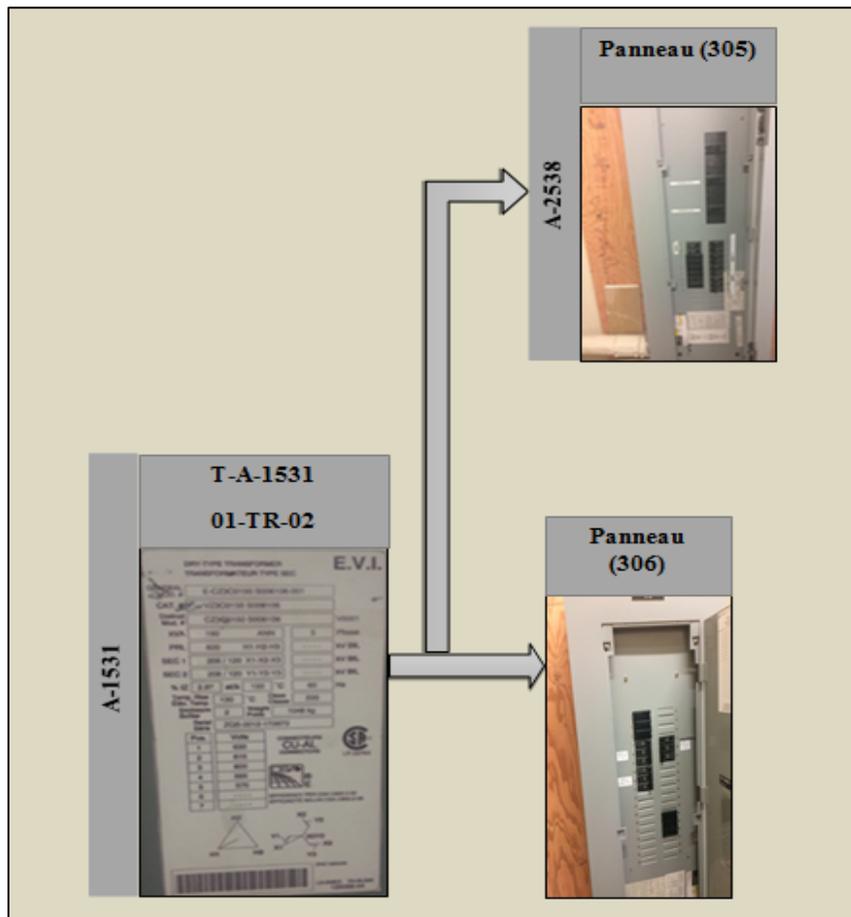


Figure 3.43 panneaux alimentés par le transformateur 01-TR-02

Du côté du panneau (305), il alimente cinq autres panneaux qui sont, le panneau (14), le panneau (15), le panneau (16), le panneau (18) et le panneau (19). Ces cinq panneaux alimentent plusieurs prises telles que; des prises de nettoyage, des prises dans les salles A-0402, A-1099, A-1446, A-1444, A-1442, A-1450, A-1532, A-1562, A-1592, A-1595 comme

celles pour réfrigérateur et comptoir, des prises caniveaux dans les salles A-1436, A-1568 et A-1538, des prises pour bureaux dans A-1500, des prises dans la salle A-1560 ainsi que le projecteur qui y est installé. Deux autres projecteurs, deux imprimantes dans A-1438 et A-1536 et des relais et l'éclairage dans A-1566 sont aussi alimentés par ces panneaux. D'autre part, ces derniers alimentent une salle de télécom à côté de la salle A-1531, la salle A-1531.1, un dépoussiéreur, des chargeurs installés dans A-1446 et le laboratoire A-1432.

Quant au panneau (306), il alimente de son côté trois autres panneaux qui sont ; le panneau (24), le panneau (25) et le panneau (26). Comme les cinq panneaux alimentés par le panneau (305) mentionnés précédemment, ces trois panneaux alimentent aussi plusieurs prises. Parmi ces prises nous pouvons mentionner : des prises de locaux comme les locaux A-2443, A-2444, A-2584, A-2537, A-2538 et A-2539, des prises de bureaux comme les bureaux A-1500, A-2400 et A-2500, des prises de nettoyage, des prises caniveaux dans A-2544, A-2566, A-2448, A-2447 et A-2442, une prise télécom dans A-2539, des prises de service dans A-2448 et pour finir des prises de type 30A/208V dans A-2452.

Les résultats des mesures expérimentales de la charge totale de chacun des panneaux (305) et (306), qui seront présentés dans ce qui suit, représentent les mesures obtenues en branchant les pinces de mesures au niveau d'un câble par phase, alors que chacune des trois phases entrantes vers ces panneaux comporte deux câbles. D'où le besoin de tenir en compte le facteur deux qu'il faut multiplier par toutes les valeurs de mesures des courants triphasés, puissances actives, réactives et apparentes.

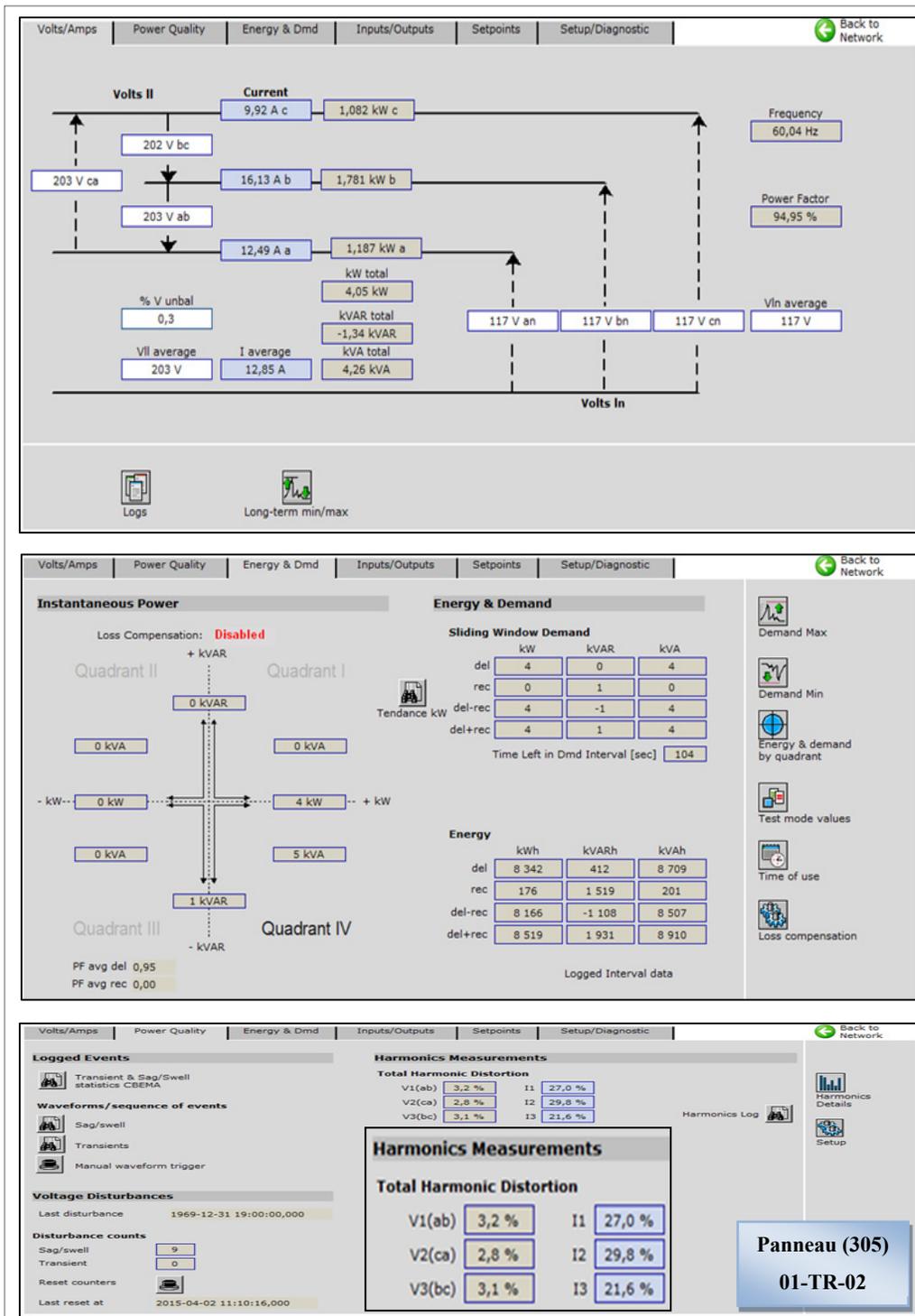


Figure 3.44 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (305) de 01-TR-02

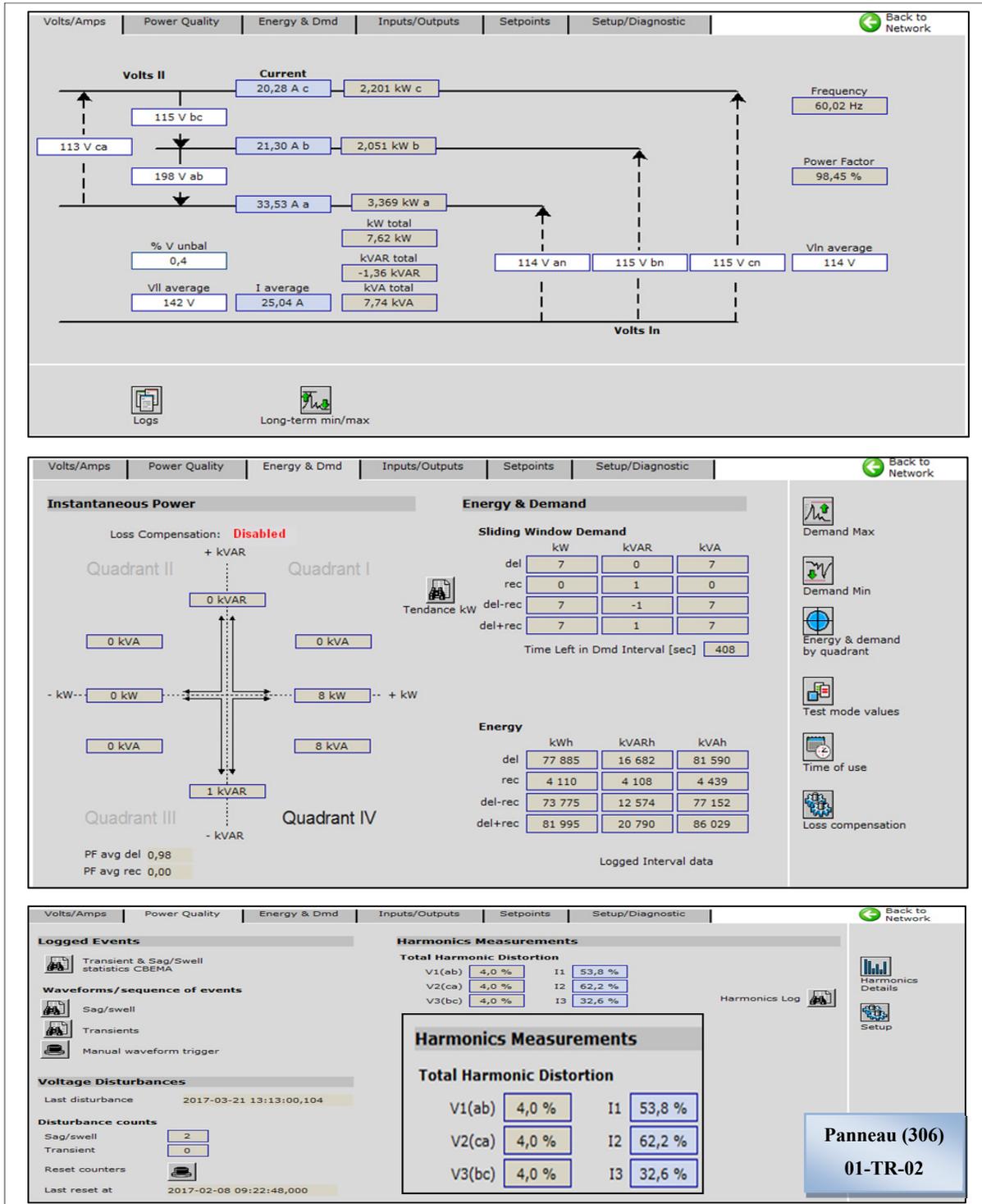


Figure 3.45 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (306) de 01-TR-02

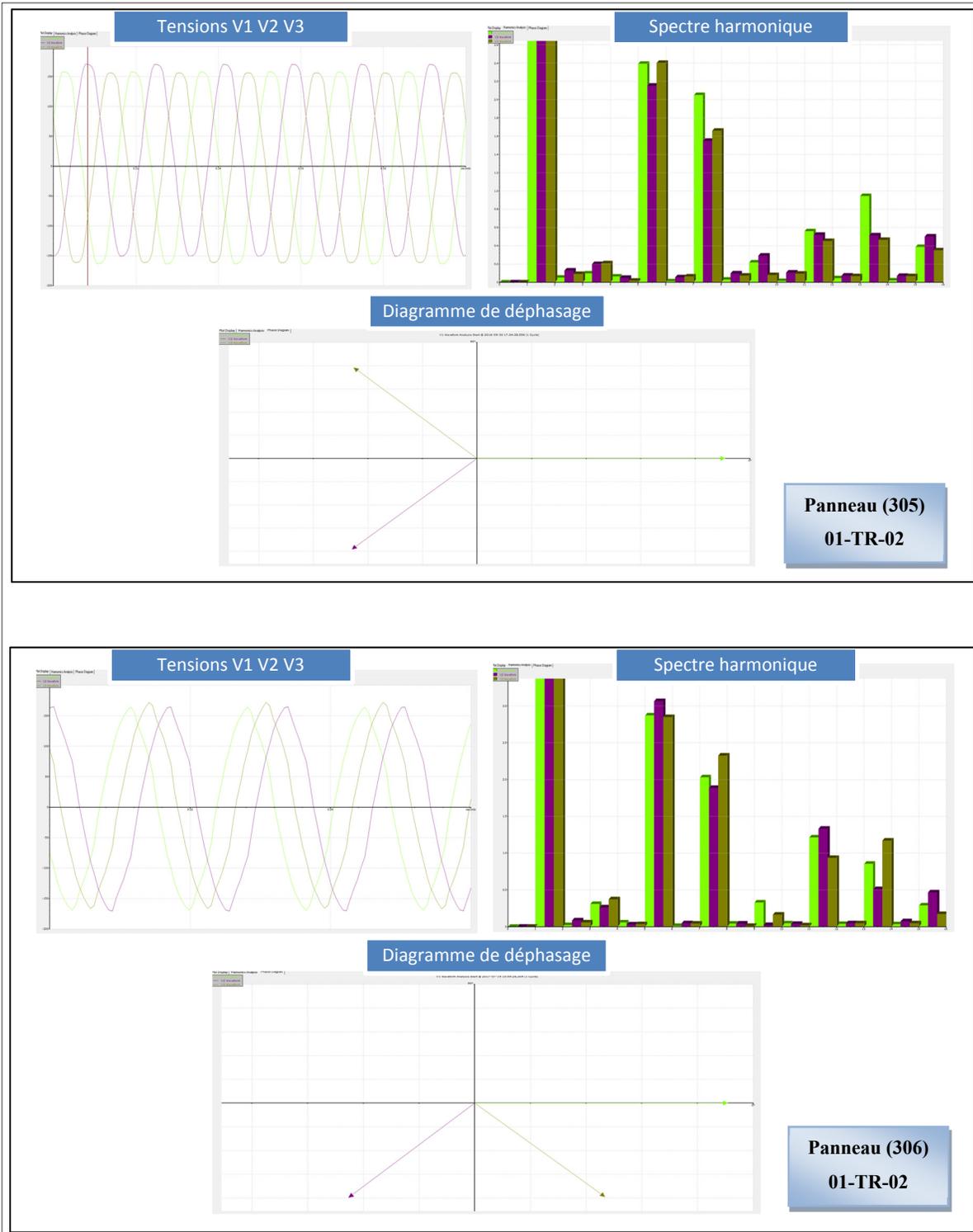


Figure 3.46 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des panneaux (305) et (306)-Transfo 01-TR-02

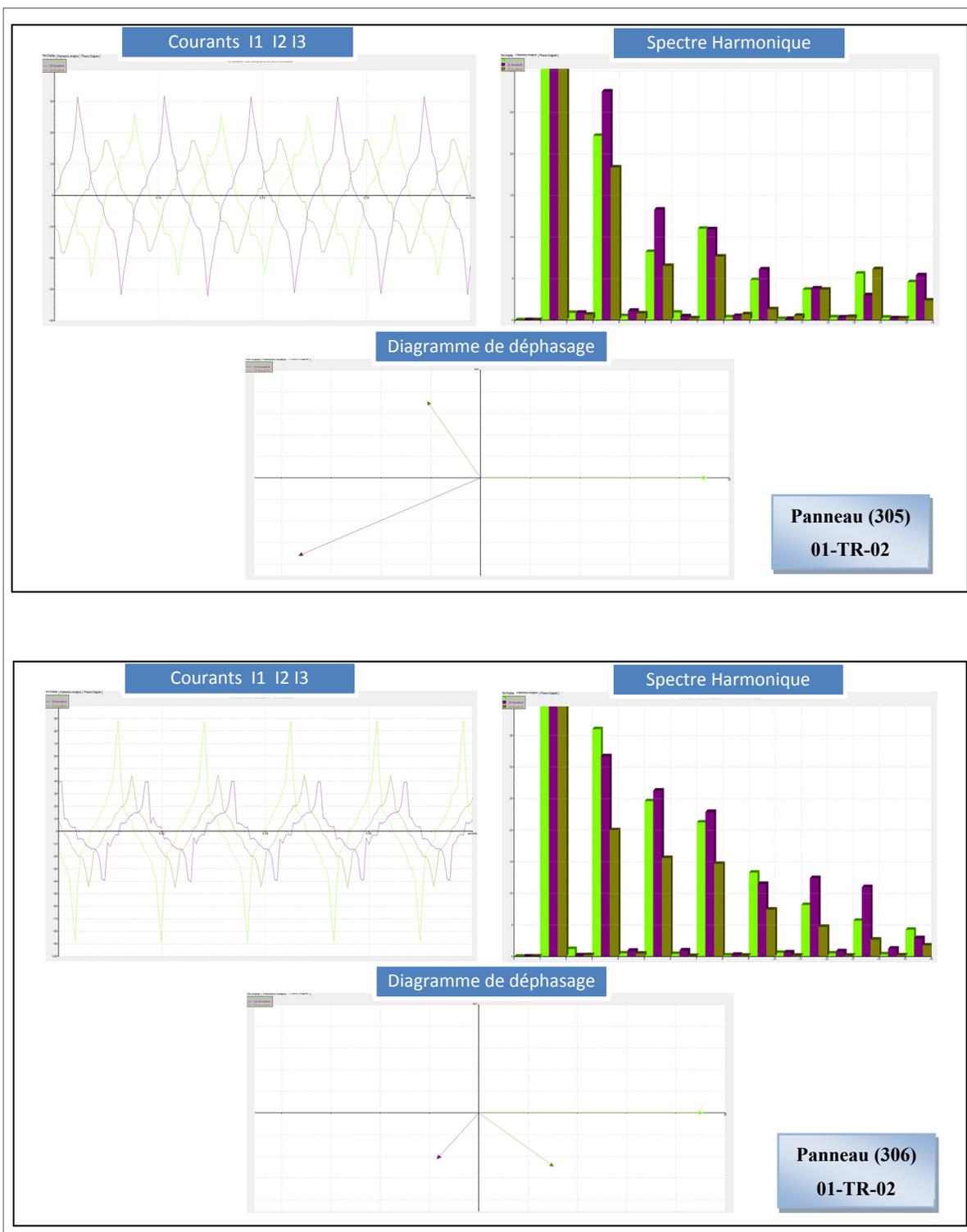


Figure 3.47 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des panneau (305) et (306) du Transfo 01-TR-02

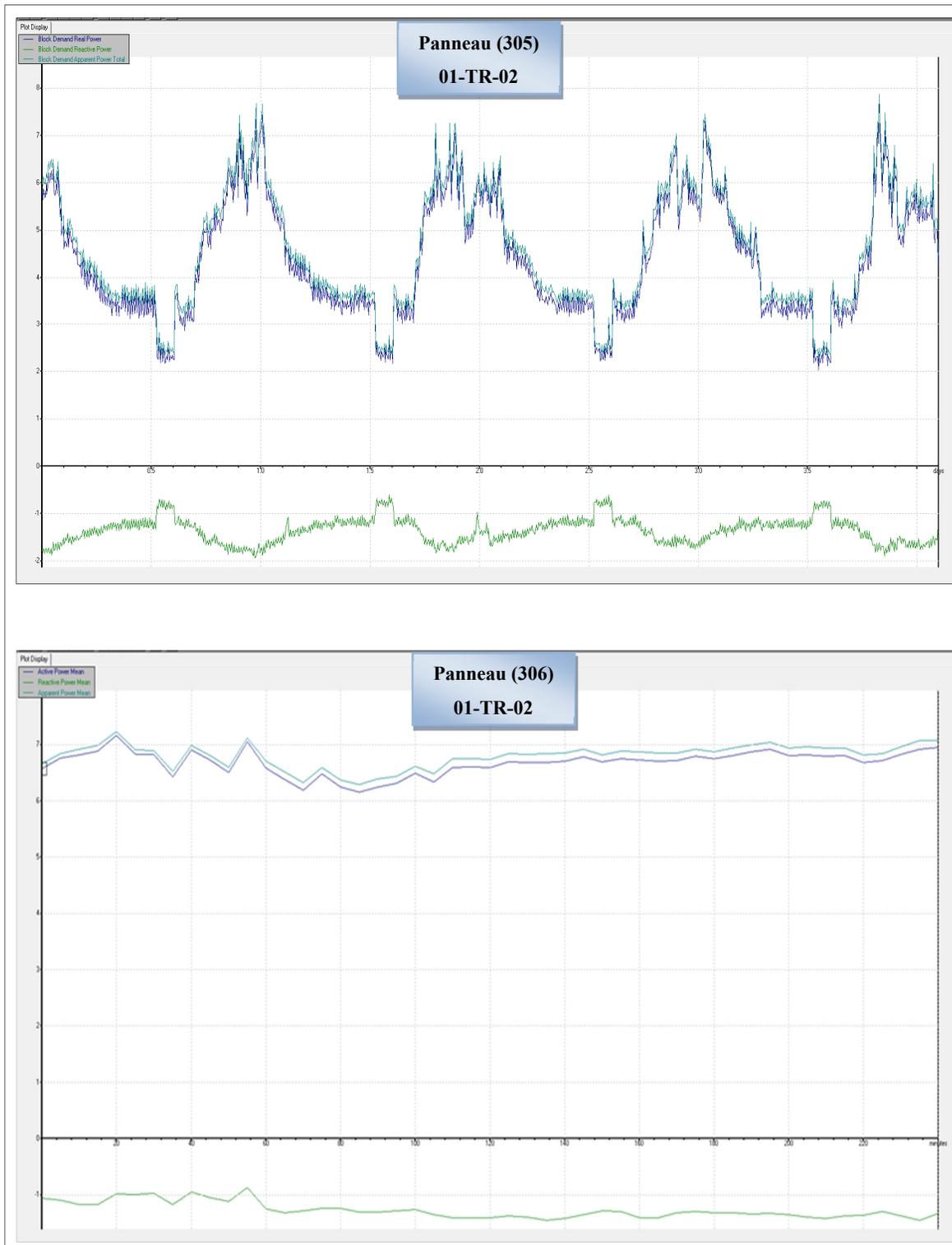


Figure 3.48 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge des panneaux (305) et (306) alimentés par le Transfo 01-TR-02

Nous avons mesuré par la suite la charge d'un autre transformateur TPPC1, qui est installé dans la salle A-1850. Ce transformateur est connecté au panneau PPC1.

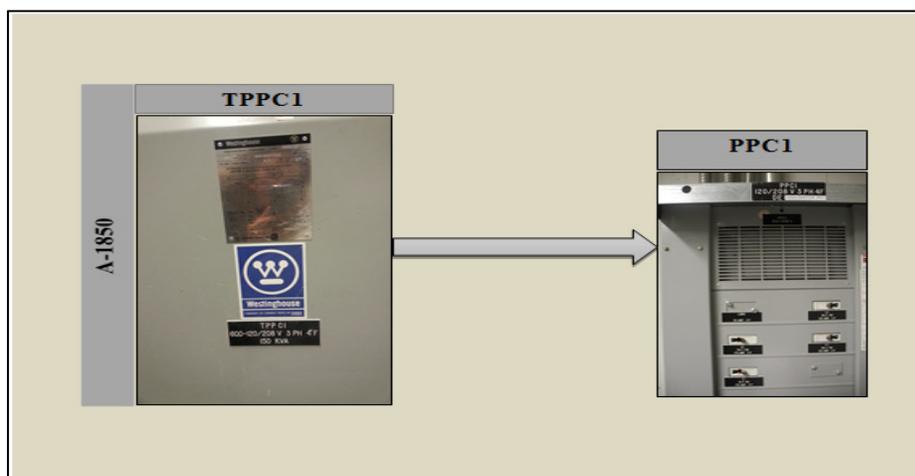


Figure 3.49 Charge alimentée par le transformateur TPPC1

Nous pouvons observer sur la photo prise du panneau PPC1 que ce dernier alimente plusieurs autres panneaux qui sont C1, E1, F1 et H1. Ces derniers alimentent à leur tour beaucoup de charges parmi lesquelles nous pouvons mentionner le drome et le laboratoire MCPE qui représente le laboratoire de modélisation et CAO des procédés environnementaux localisé dans la salle A-1508. Des laboratoires sont aussi alimentés par ces panneaux qui sont le laboratoire de calcul et de technologie de l'information appliquée que nous trouvons dans les deux salles A-1602 et la salle A-1600 et le laboratoire de recherche résistance des matériaux et statique localisé dans A-1590. À part ces laboratoires, le panneau PPC1 alimente deux salles de microordinateurs A-1136 et A-1138 et des serveurs installés dans les locaux A-1762, A-1200, A-1206 et A-1202, le Club étudiants 16, les bureaux des étudiants du 2^{ème} et 3^{ème} cycle, la salle de cafétéria A-1724, la salle de SCGC A-1750 qui représente la société canadienne de génie civile, l'électricité de la salle A-1850 et le bureau de chantier.

Les mesures expérimentales en temps réel de la charge totale du panneau PPC1 sont présentées comme suit :

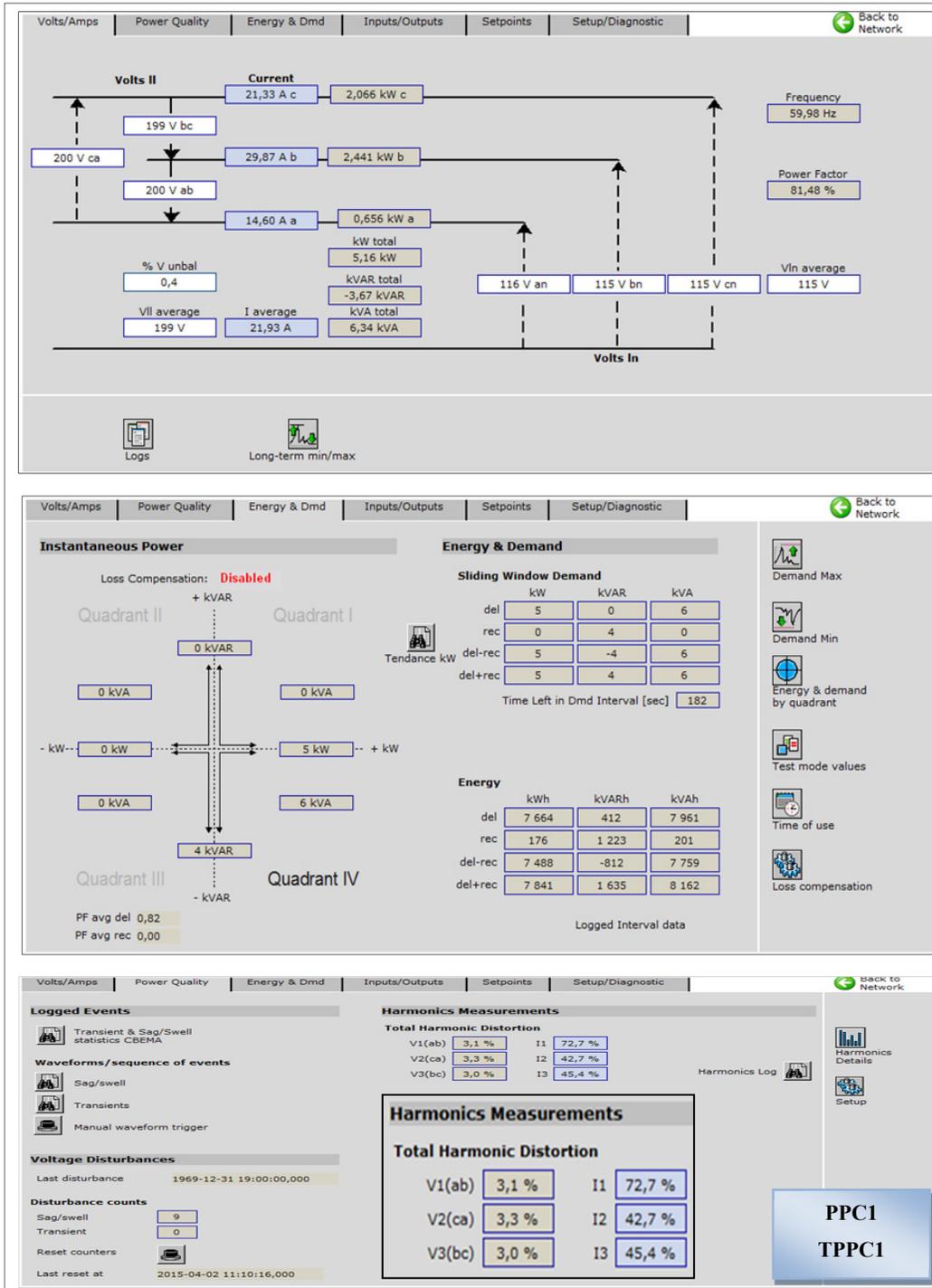


Figure 3.50 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPC1 de TPPC1

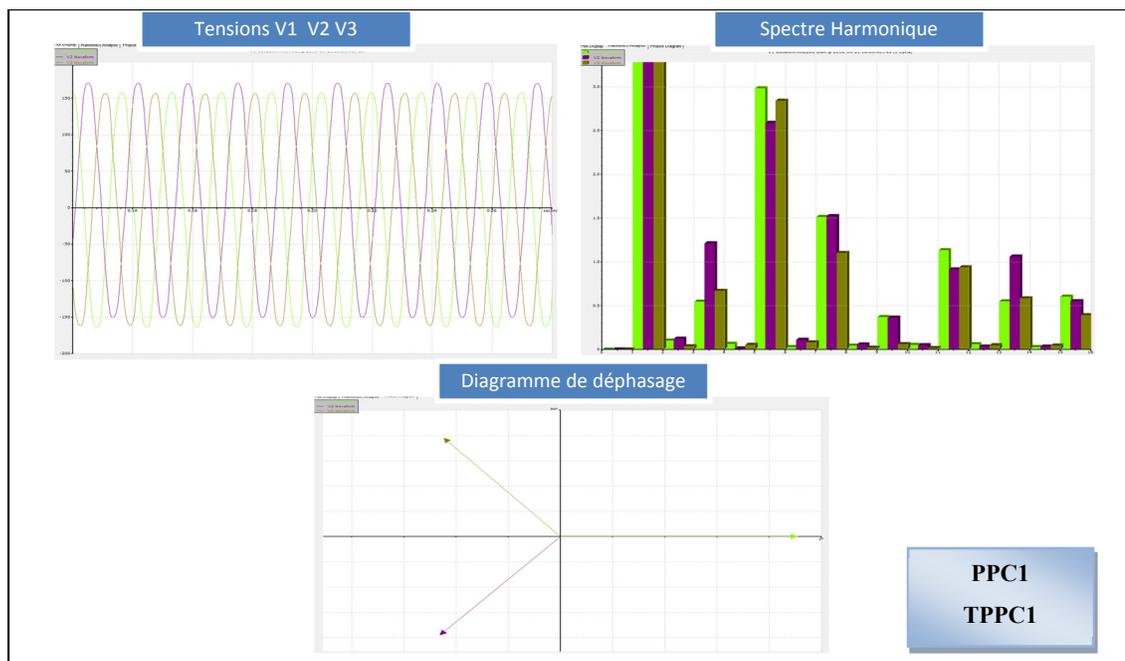


Figure 3.51 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPC1 du Transfo TPPC1

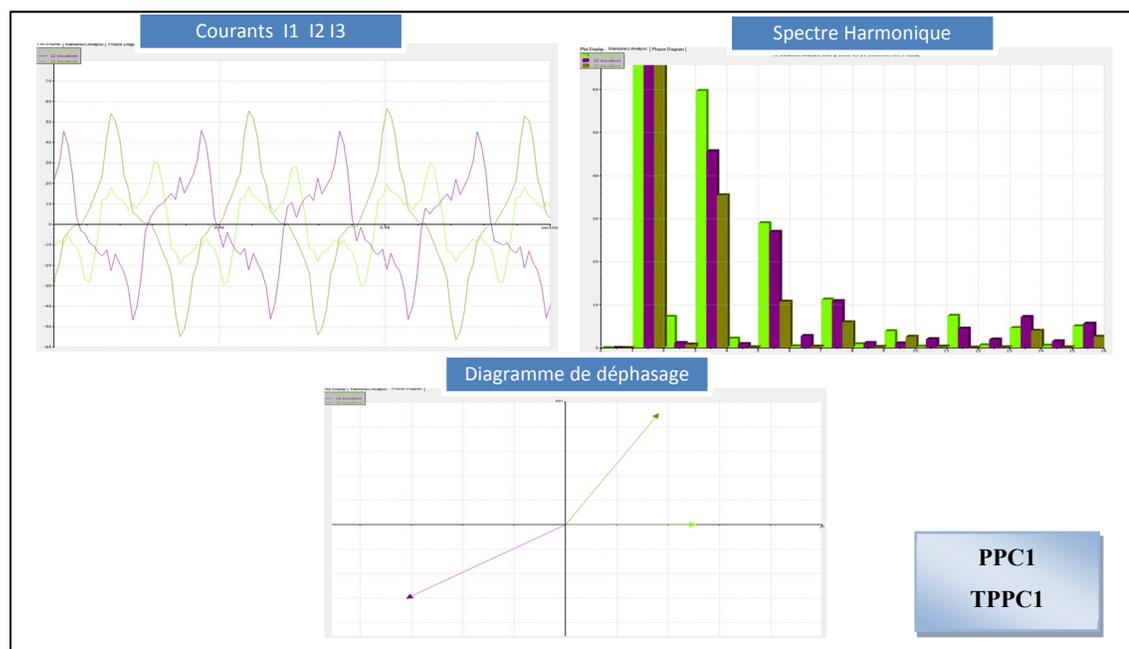


Figure 3.52 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPC1 du Transfo TPPC1



Figure 3.53 Évolution des puissances active, réactive et apparente au niveau de la charge du panneau (305) du Transfo 01-TR-02

Par la suite, nous nous sommes intéressés à la charge de deux autres transformateurs de puissance apparente 225kVA nouvellement installés dans la salle A-2536.1 avec une UPS (Uninterruptible Power Supply) qui représente un ensemble de batteries. Cette dernière a remplacé l'UPS 3 qui a été envoyée pour être installée dans la maison des étudiants au sous-sol 2, dans la salle E.S2-013.

L'installation de ces deux transformateurs et de la nouvelle l'UPS est représentée par la figure 3.54.

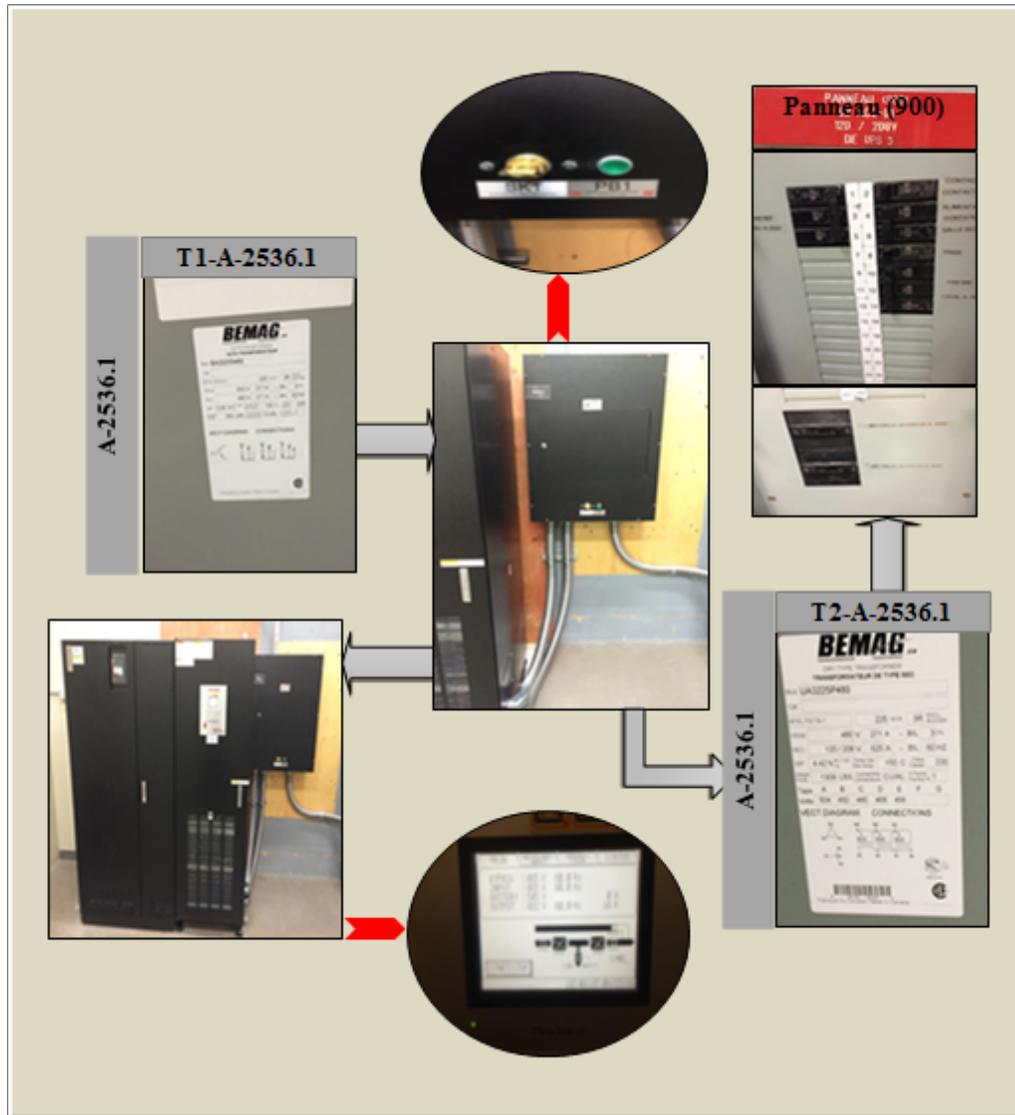


Figure 3.54 Installation des deux Transformateurs dans A-2536.1 et leurs charges

Comme la figure 3.54 le montre, le premier transformateur T1-A-2536.1 dont le primaire est de 600V et le secondaire est de 480V, alimente un panneau représenté par la boîte noire dans la figure ci-dessus et qui joue le rôle d'un bypass tel qu'il comporte deux interrupteurs SK1 et PB1. Par la suite, grâce au retour existant et partant de l'UPS vers la petite boîte noire, l'énergie est fournie pour l'alimentation du deuxième transformateur électrique T2-A-2536.1

dont le primaire est de 480V et le secondaire est de 208V. Ce deuxième transformateur alimente le panneau (900) qui à son tour alimente de nombreuses charges telles que les deux panneaux électriques (902) et (906), le local A2531, ainsi que les deux panneaux (903) et (907).

Pour le panneau (902), il alimente de multiples salles de télécom : la salle de télécom A-1538 au premier étage, la salle de télécom A-3450 au troisième étage, la salle de télécom A-2532 au deuxième étage, la salle de télécom A-0671 au rez-de-chaussée et la salle de télécom A-4501 au quatrième étage. En plus des salles de télécom, Il alimente aussi le télécopieur au local A-4500, les prises alimentant le laboratoire de structure, les prises alimentant les portes d'accès aux locaux A-3647, A-1537, A-4501, A-3541 et A-2532, la prise alimentant les caméras au local A-2561 et les deux postes RC-D6-01 et RC-D6-02.

Quant au panneau (906), il alimente les salles de télécom A-2539, A-1530, A-3547 et A-4509 et fournit de l'énergie pour l'accès des portes pour les salles A-3547, A-2539, A-1530, et A-4509.

Pour finir avec les deux panneaux alimentés par le panneau (900), dont ils s'agissent des panneaux (903) et (907) et qui sont installés dans la salle des serveurs A-3550, ils alimentent une partie des cabines de serveurs installées aussi dans la salle des serveurs A-3550.

Après avoir identifié tous les panneaux et les charges qu'ils alimentent, nous avons mesuré la charge totale de chaque transformateur installé dans la salle A-2536.1 et nous avons obtenus les résultats expérimentaux suivants :

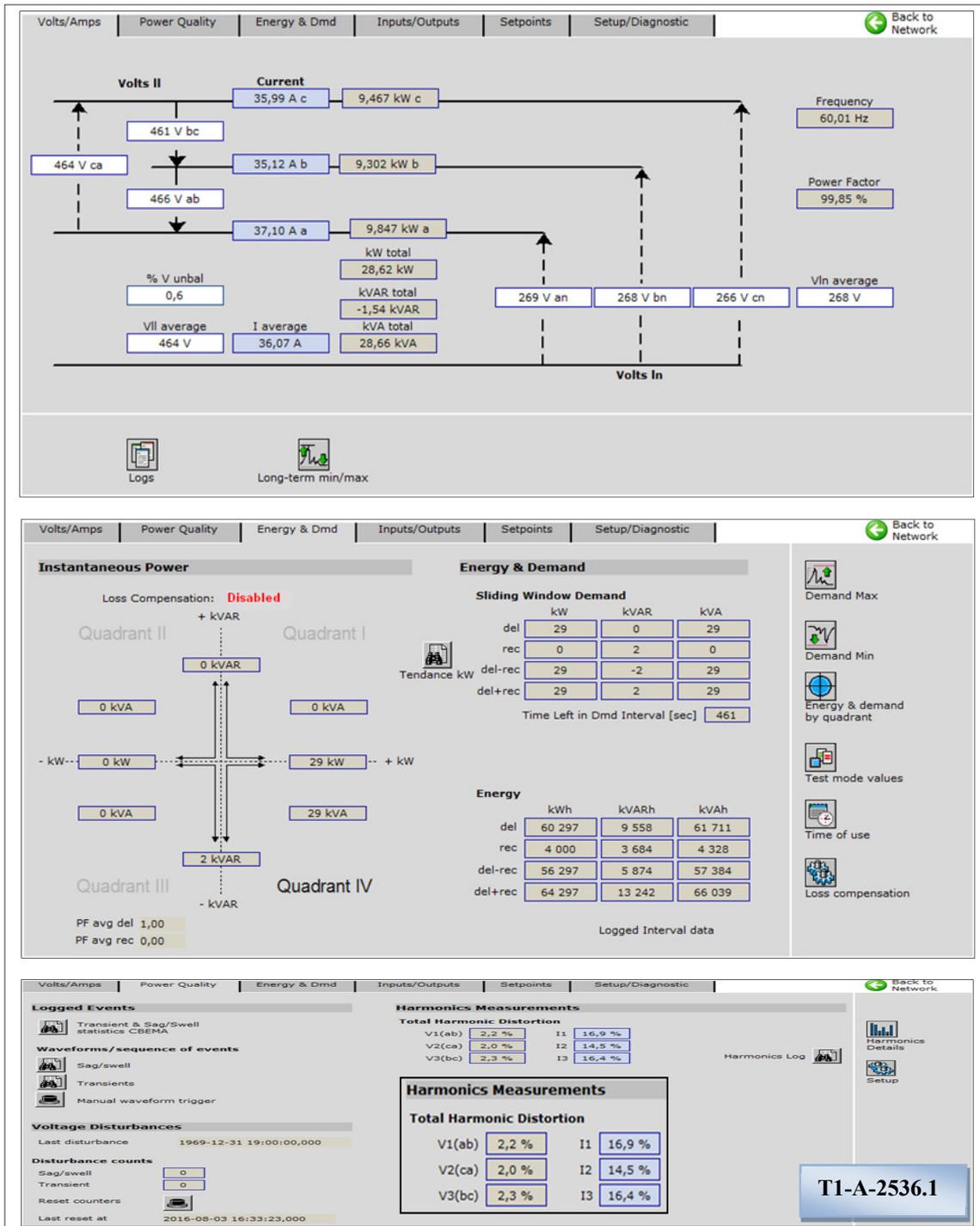


Figure 3.55 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du transfo T1-A-2536.1

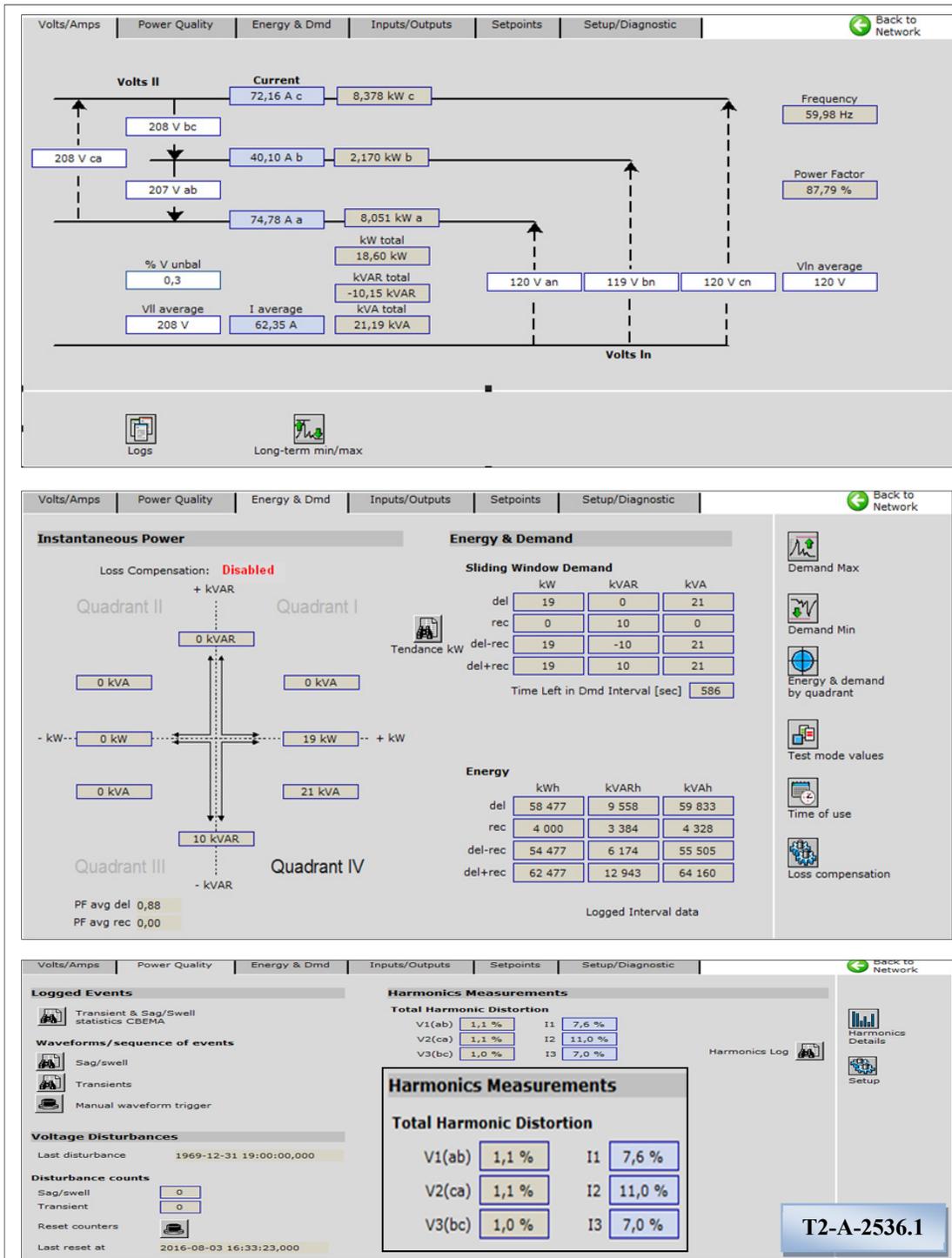


Figure 3.56 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du transfo T2-A-2536.1

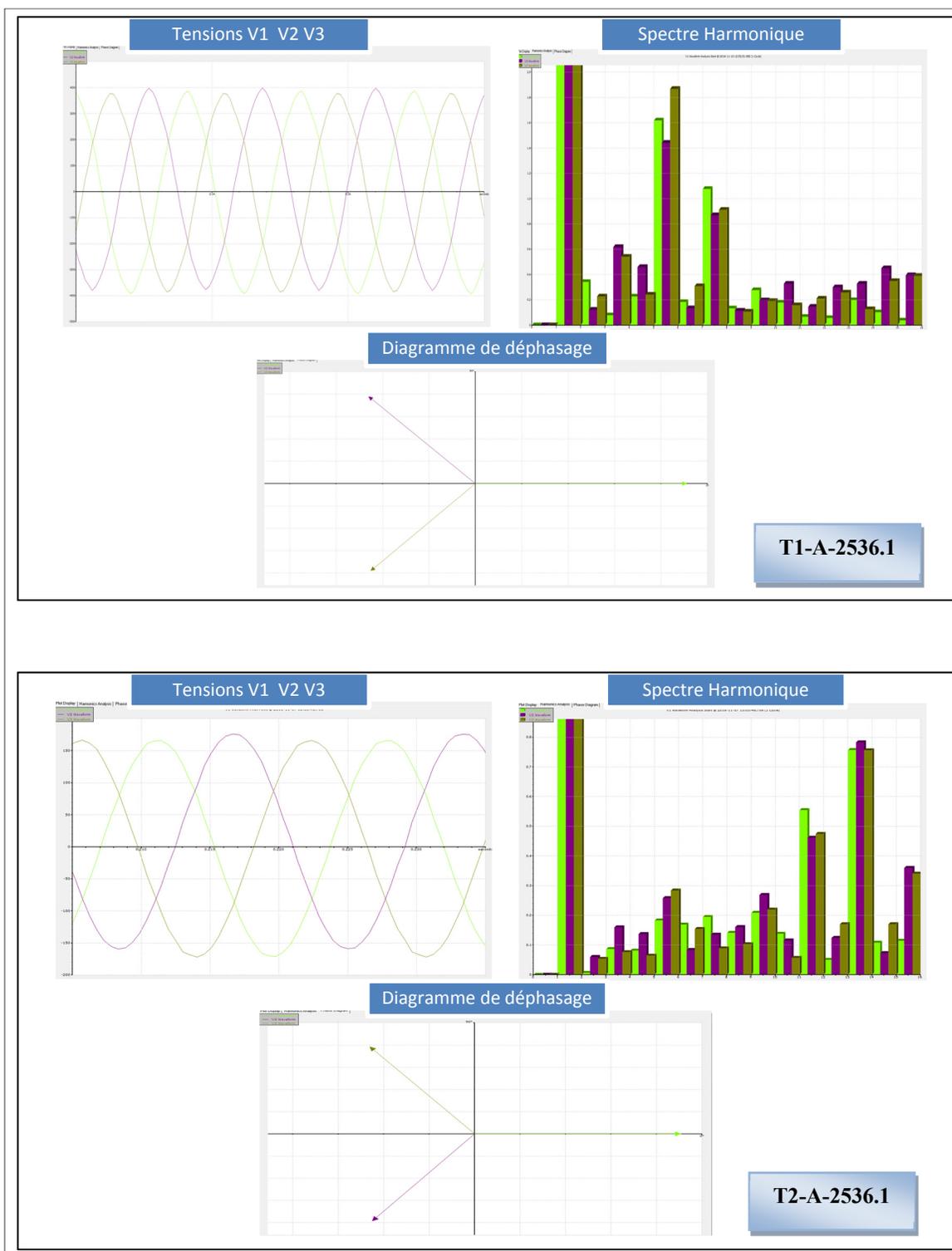


Figure 3.57 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des transfos T1-A-2536.1 et T2-A-2536.1

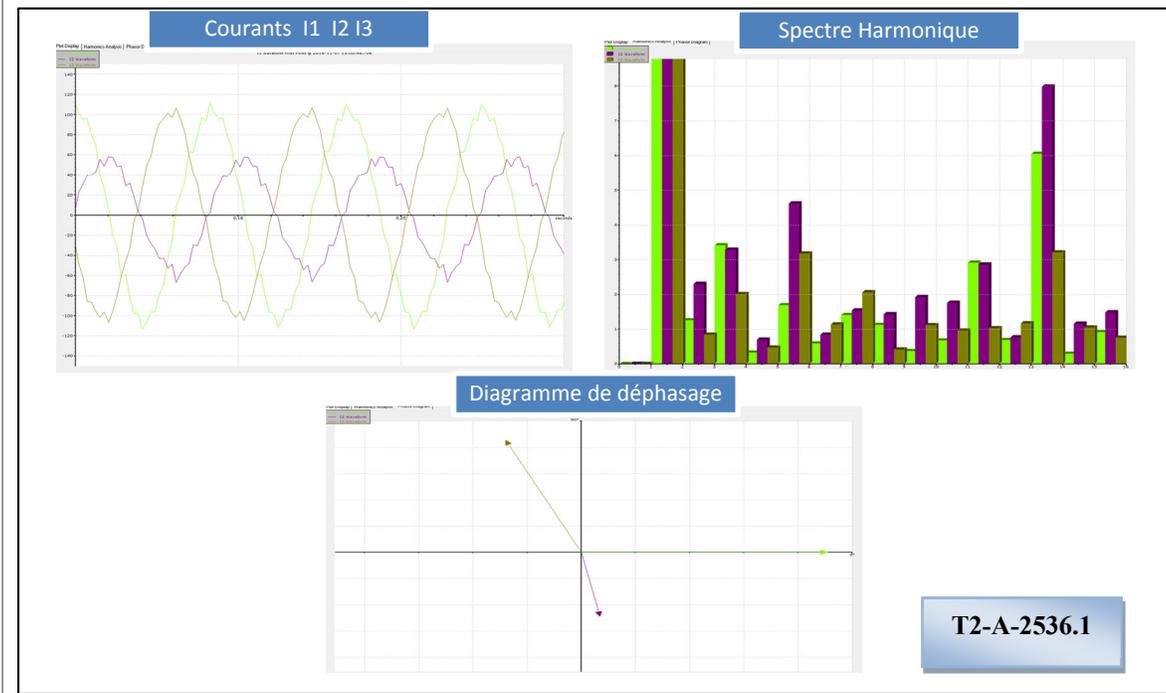


Figure 3.58 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des transfos T1-A-2536.1 et T2-A-2536.1

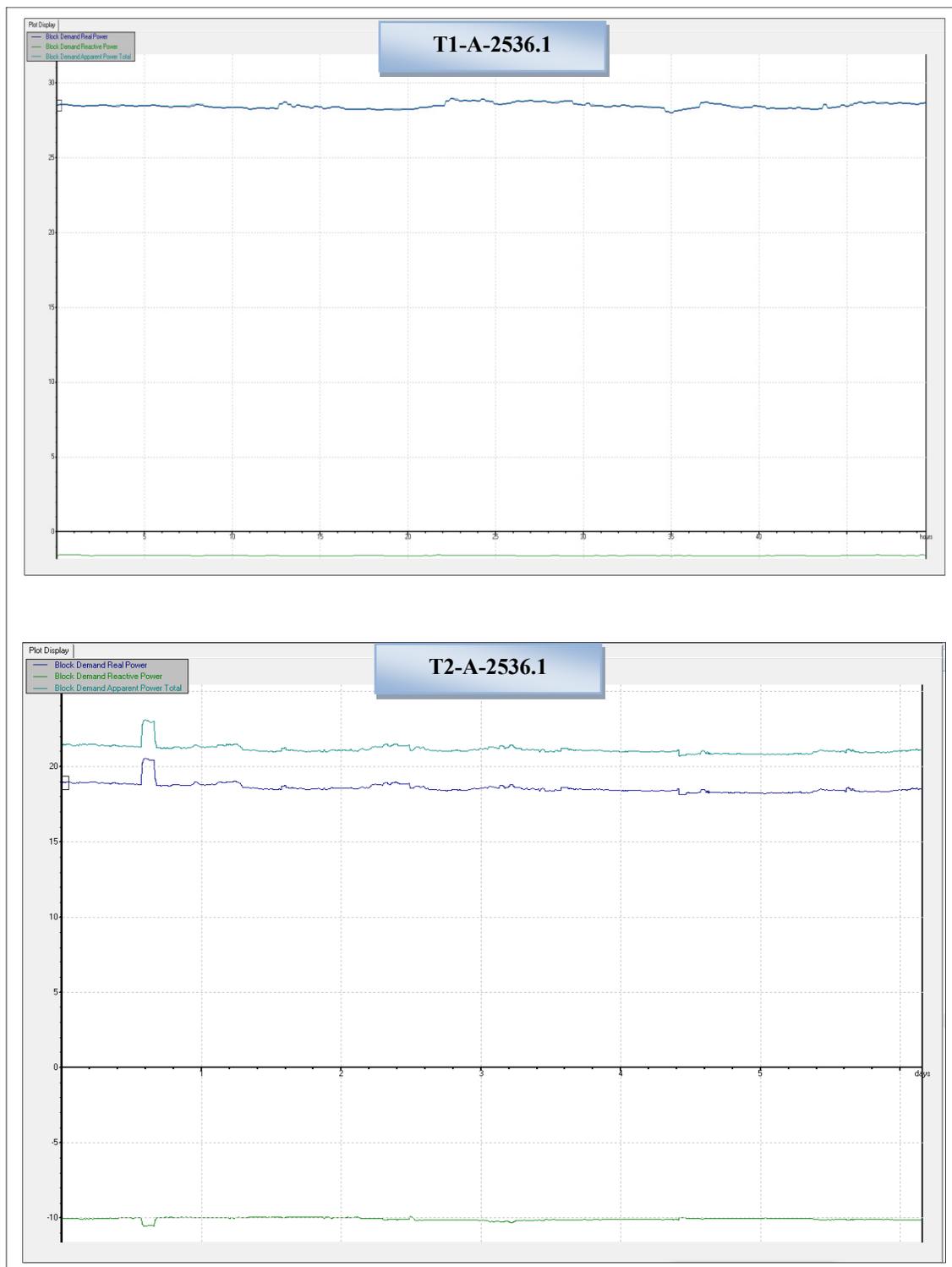


Figure 3.59 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge des Transfos T1-A-2536.1 et T2-A-2536.1

Pas très loin de la salle A-2536.1, nous trouvons un autre transformateur de puissance apparente supérieure à 100kVA ; il s'agit du transformateur T3 installé dans la salle électrique A-2762 qui ouvre sur le laboratoire GREPCI (Groupe de Recherche en Électronique de Puissance et Commande Industrielle).

Ce transformateur alimente deux moteurs identiques M1 et M2 dont la puissance apparente nominale d'entrée de chacun est de 53kVA et la puissance apparente nominale de la sortie est de 45kVA. Cependant, ces deux moteurs nommés Sources California n'étaient pas en marche donc nous n'étions pas capables de mesurer leur consommation en temps réel et ainsi la charge du transformateur T3-A-2762.

Nous pouvons voir sur la figure 3.60 les plaques signalétiques du transformateur et des deux moteurs.

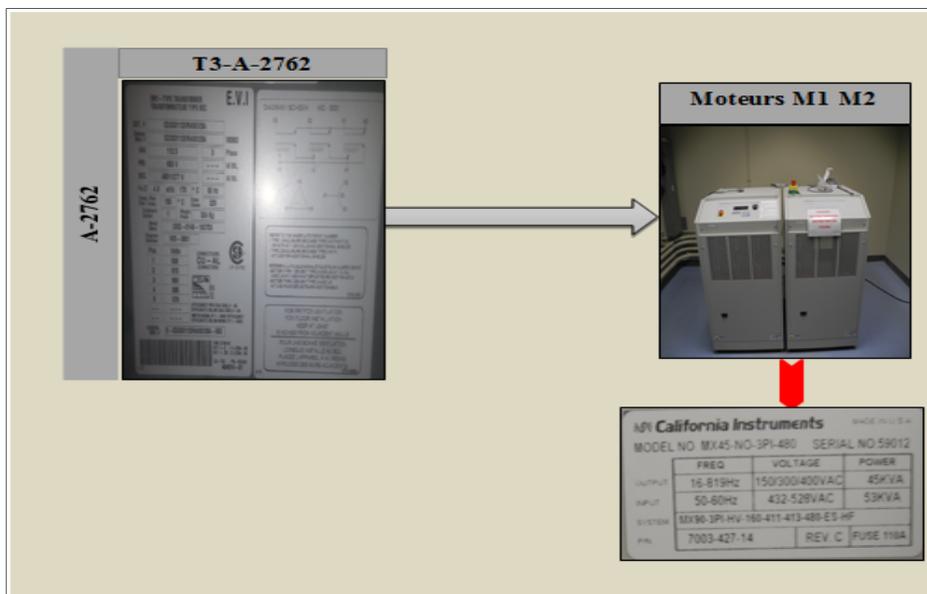


Figure 3.60 Plaques signalétiques du Transfo T3-A-2762 et des deux moteurs M1 et M2

La charge en temps réel d'un autre transformateur de grande puissance ; 225kVA pour être exacte, a été mesurée à l'aide de l'analyseur. En effet, il s'agit du transformateur TPPD2

installé dans la salle A-2840. Ce transformateur ainsi que la charge alimentée par celui-ci sont représentés par la figure 3.61.

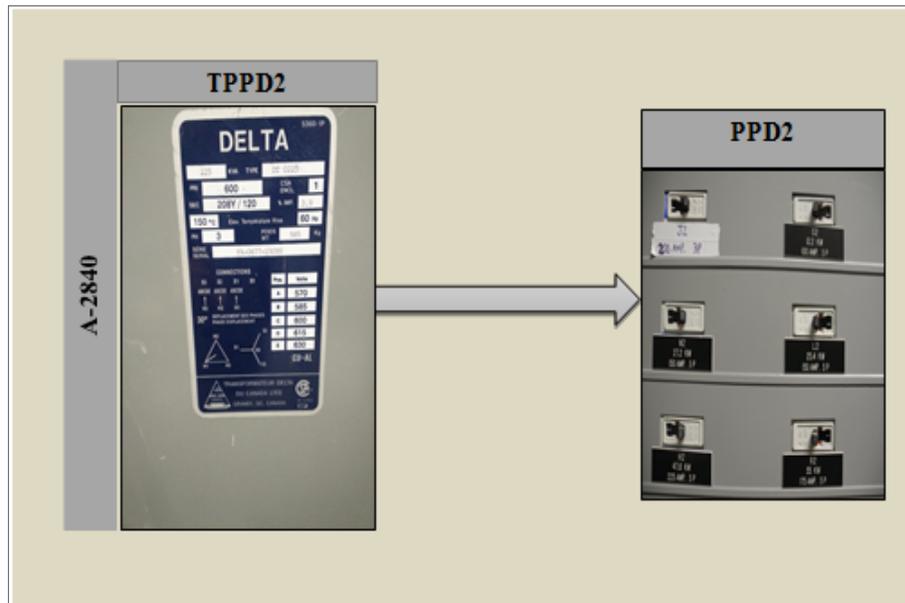


Figure 3.61 Charge alimentée par le transformateur TPPD2

La plaque signalétique du panneau PPD2 montre que celui-ci alimente plusieurs autres panneaux comme J2, N2, L2, G2, R2, H2. Ces derniers alimentent plusieurs prises de plusieurs salles comme A-2802, A-2814, A-2302, A-2303, A-2310, A-2312, A-2360, A-2100, A-2106, A-2104, A-2150, A-2158, A-2150.1, A-2150.2, A-2150.3. Dans cette dernière salle mentionnée, A-2150.3, ces panneaux alimentent des hottes, des compteurs, une pompe 2, une machine PYRADIA verte, une tronçonneuse et des prises de tables. Et du côté de la salle A-2302, une autre machine de type Fritsch Pulvarisette Vario Panitary Mill est aussi alimentée par ces panneaux.

En plus, des prises de service sont alimentées par ces panneaux et que nous trouvons dans les locaux, A-2800, A-2800, A-2808, A-2800, A-2812, A-2822, A-2834, A-2800, A-2840. Mais

le plus intéressant est le fait que le panneau N2 alimente le panneau O2 qui alimente tout le laboratoire GREPCI avec tous les équipements qui y sont installés.

Nous avons mesuré la charge totale du panneau PPD2 autrement dit du transformateur TPPD2 et les résultats que nous avons obtenus sont donnés par les figures 3.62, 3.63, 3.64 et 3.65.

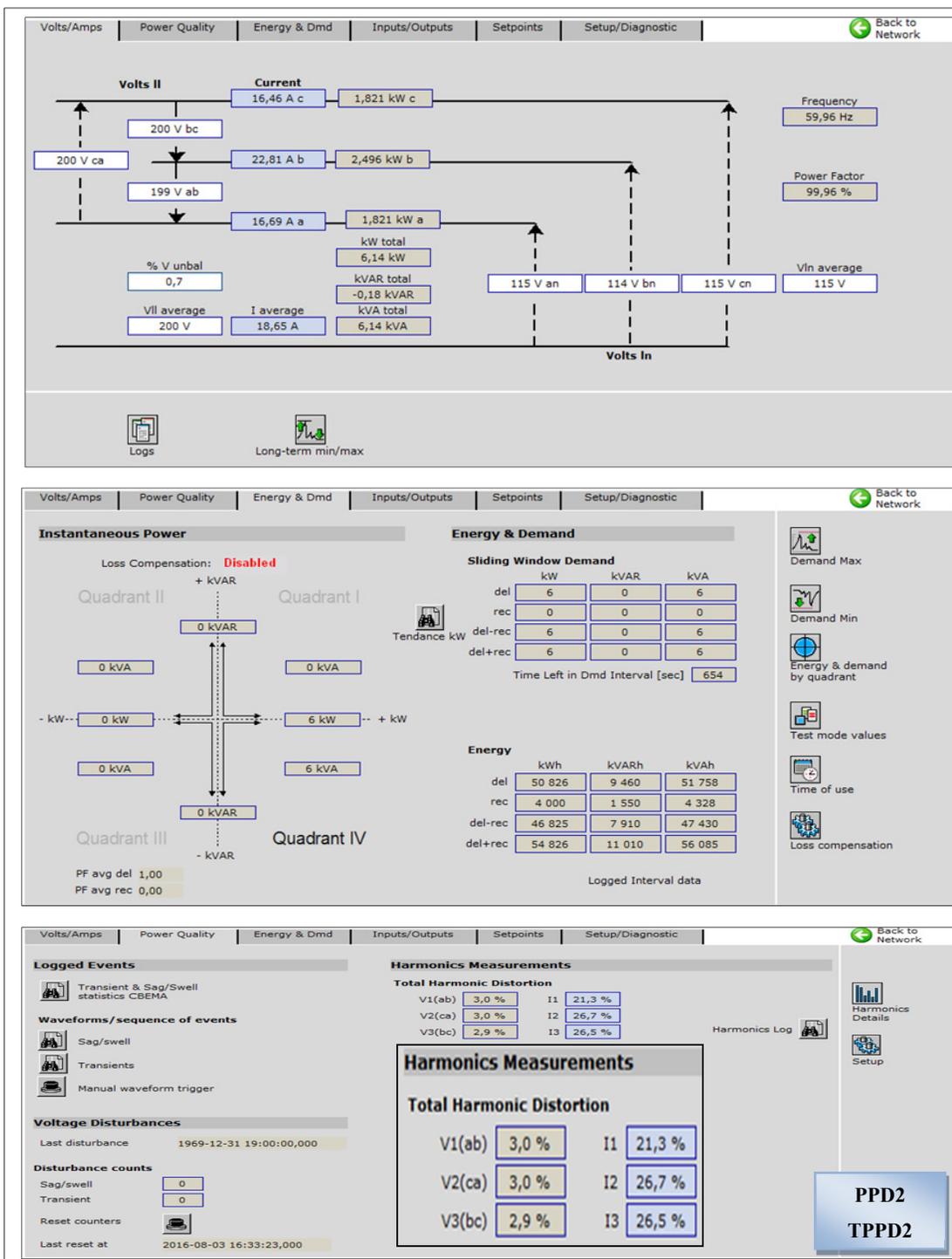


Figure 3.62 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du transfo TPPD2

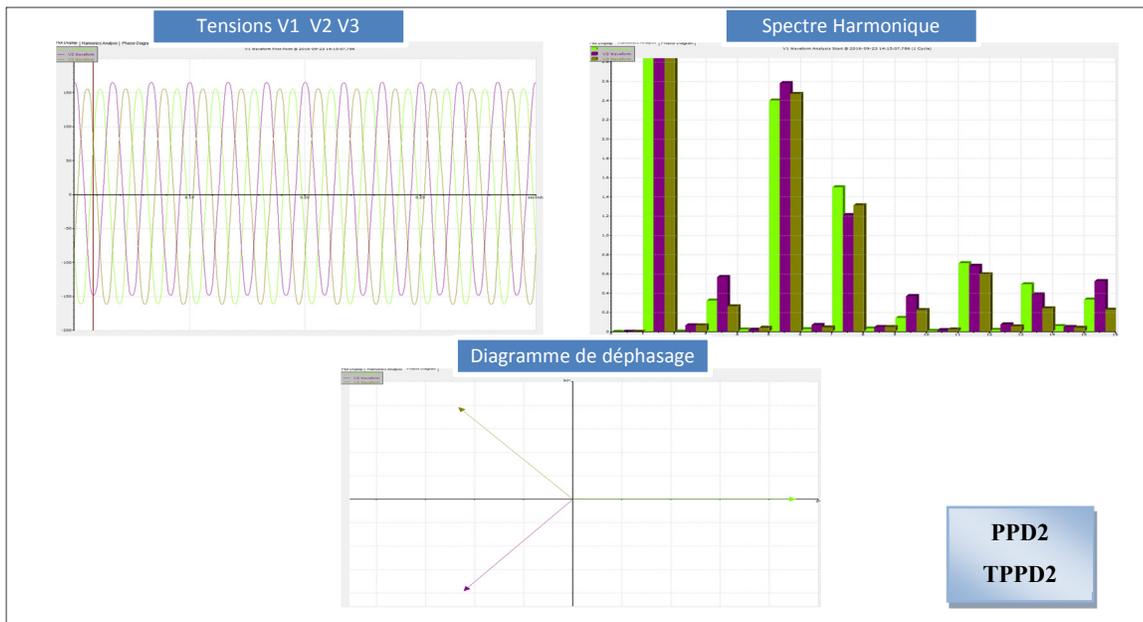


Figure 3.63 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du transfo TPPD2

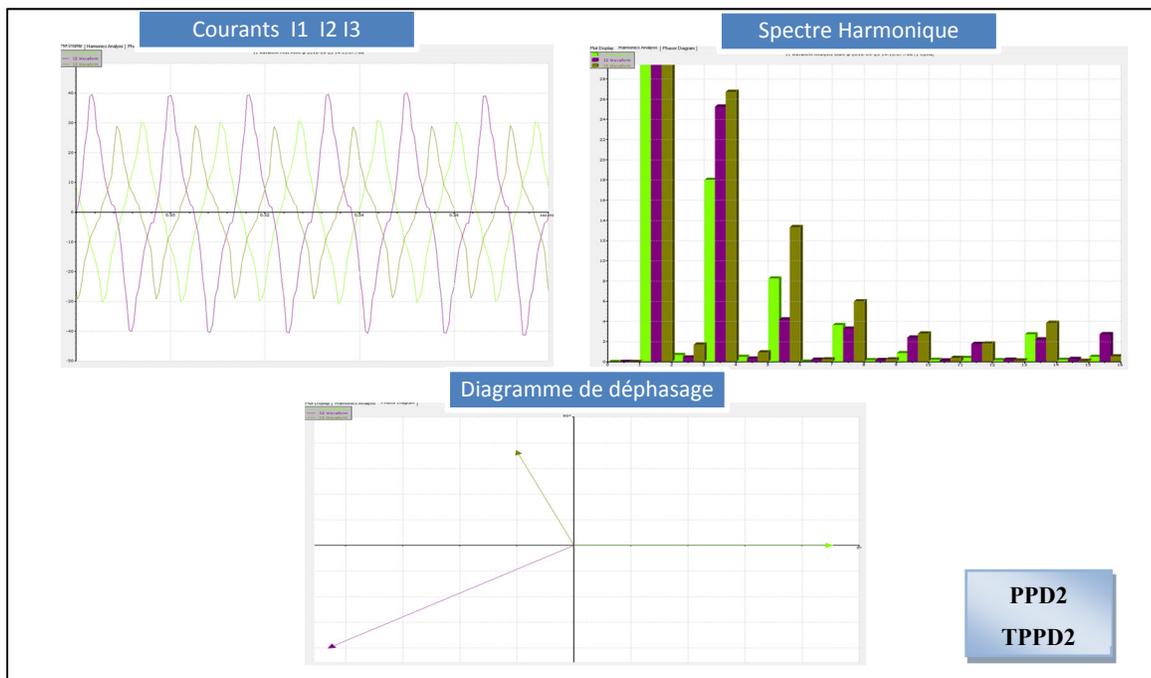


Figure 3.64 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du transfo TPPD2

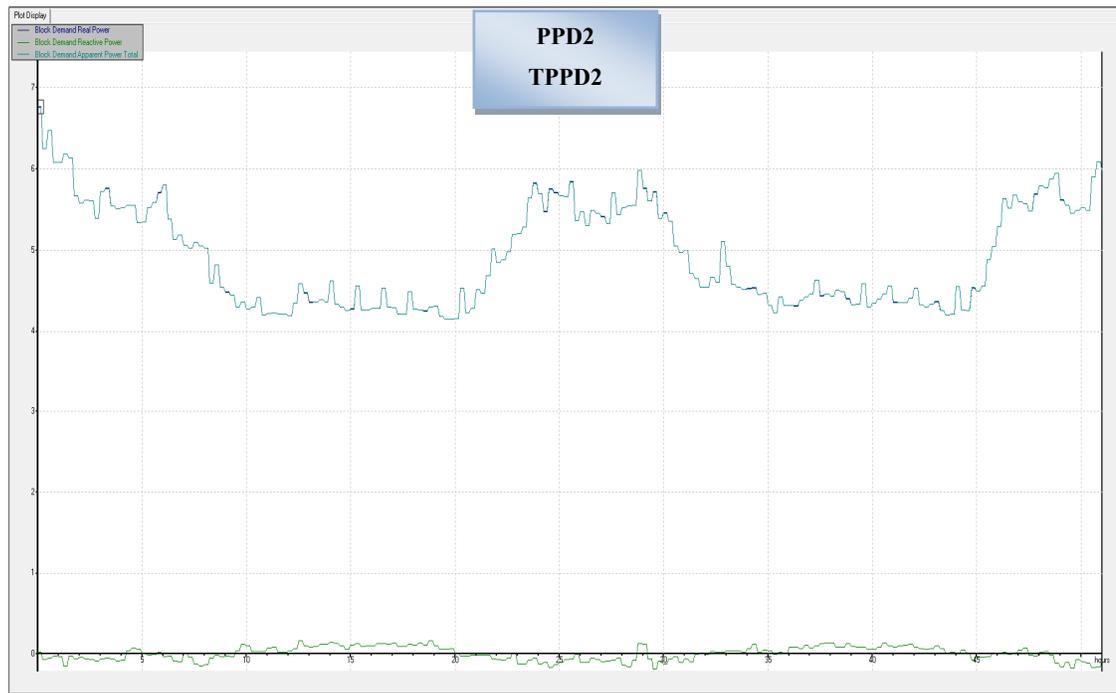


Figure 3.65 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du Transfos TPPD2

Nous nous sommes dirigés par la suite au 3^{ème} étage du pavillon A et nous avons commencé nos mesures au local A-3502 où deux transformateurs y étaient installés tel que le premier est de puissance apparente nominale 775kVA et alimente un refroidisseur. Cependant, nous n'étions pas en mesure d'avoir la charge en temps réel du refroidisseur étant donné que nos mesures ont été prises pendant l'automne et l'hiver alors que le refroidisseur était en état d'arrêt au cours de ces deux saisons. Donc nous nous sommes contentés de mesurer le deuxième transformateur qui est le T2-A-3502 dont la puissance apparente nominale est égale à 112.5kVA.

L'installation des deux transformateurs T1-A-3502 et T2-A-3502 est représentée respectivement par les figures 3.66 et 3.67.

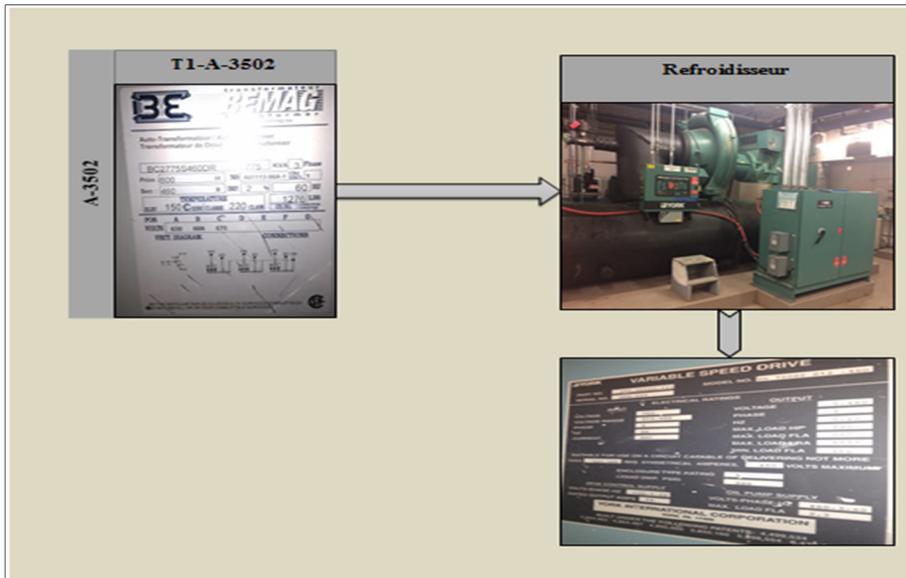


Figure 3.66 Refroidisseur alimenté par le transformateur T1-A-3502

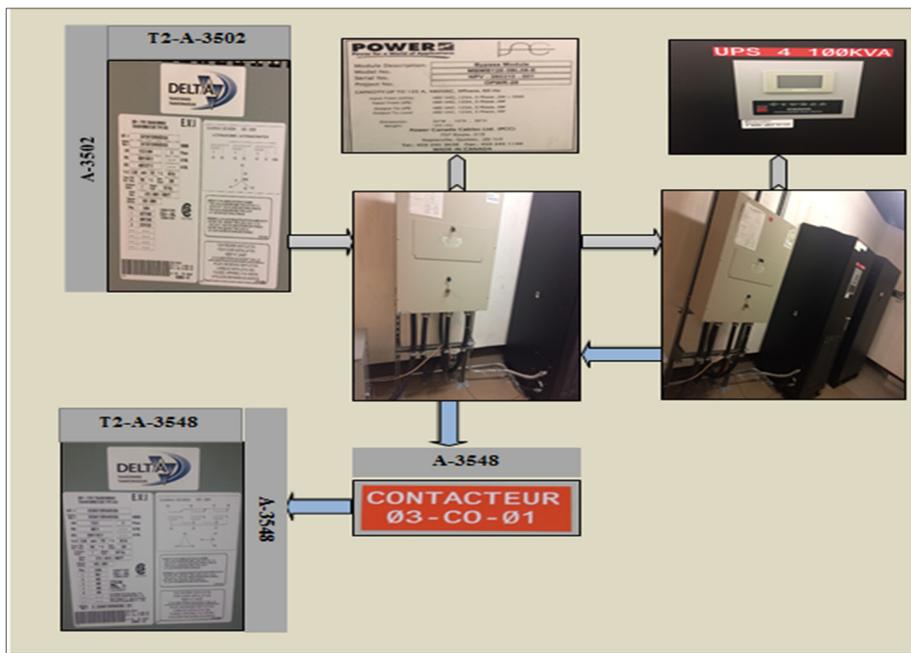


Figure 3.67 Charge alimentée par le transformateur T2-A-3502

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.67, le transformateur T2-A-3502 alimente le bypass représenté dans la figure par le panneau ou boîte en blanc. Entre ce bypass et l'UPS 4 (Uninterruptible Power Supply) représentée par la boîte noire dans la figure 3.67, il existe une connexion à deux câbles dont le premier part du bypass pour alimenter l'UPS 4 et dont le deuxième part de l'UPS 4 qui retourne de l'énergie vers le bypass pour que ce dernier alimente un contacteur installé au 3^{ème} étage dans la salle A-3548.

En effet, il s'agit du contacteur 03-CO-01 qui alimente un transformateur nommé T2-A-3548 installé dans la même salle A-3548 que le contacteur. Ce transformateur dont la tension du primaire est égale à 480V alimente à son tour deux panneaux (35) et (36) localisés dans la salle des serveurs A-3550 et qui alimentent évidemment une partie des cabines des serveurs tel que rappelons-le, l'autre partie des cabines des serveurs est alimentée par les panneaux (903) et (907) vus précédemment et qui sont alimentés par le panneau (900) qui est alimenté de son côté par le transformateur T2-A-2536.1 connecté à l'autre UPS.

Notons que nous avons mesuré également la charge aux bornes du transformateur T2-A-3548 dont nous présenterons les résultats obtenus en plus de détails dans la suite de ce chapitre. Pour l'instant, suite aux mesures effectuées au niveau de la charge du transformateur T2-A-3502, nous présentons ce que nous avons obtenu comme résultats.

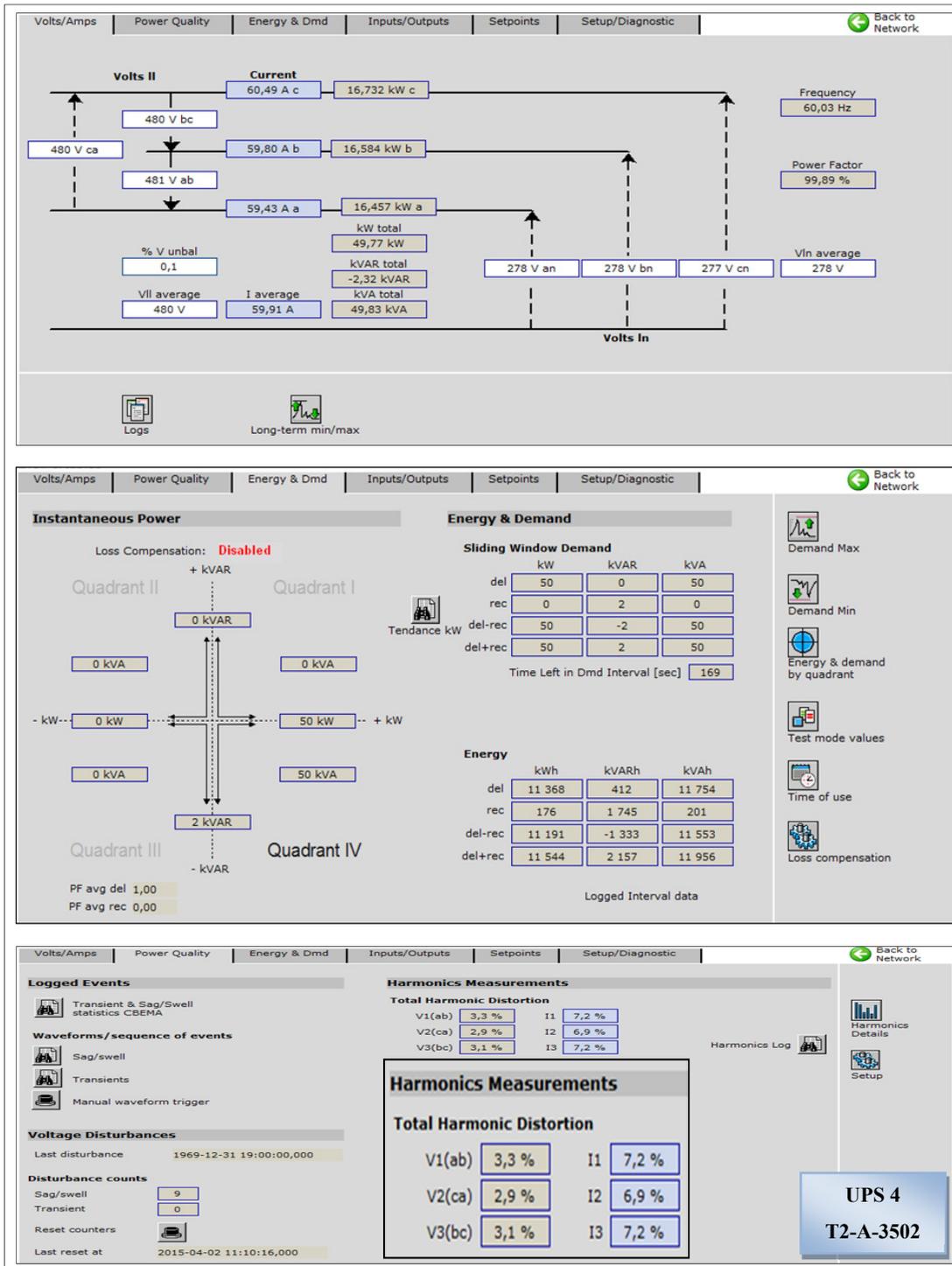


Figure 3.68 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge connectée au transformateur T2-A-3502

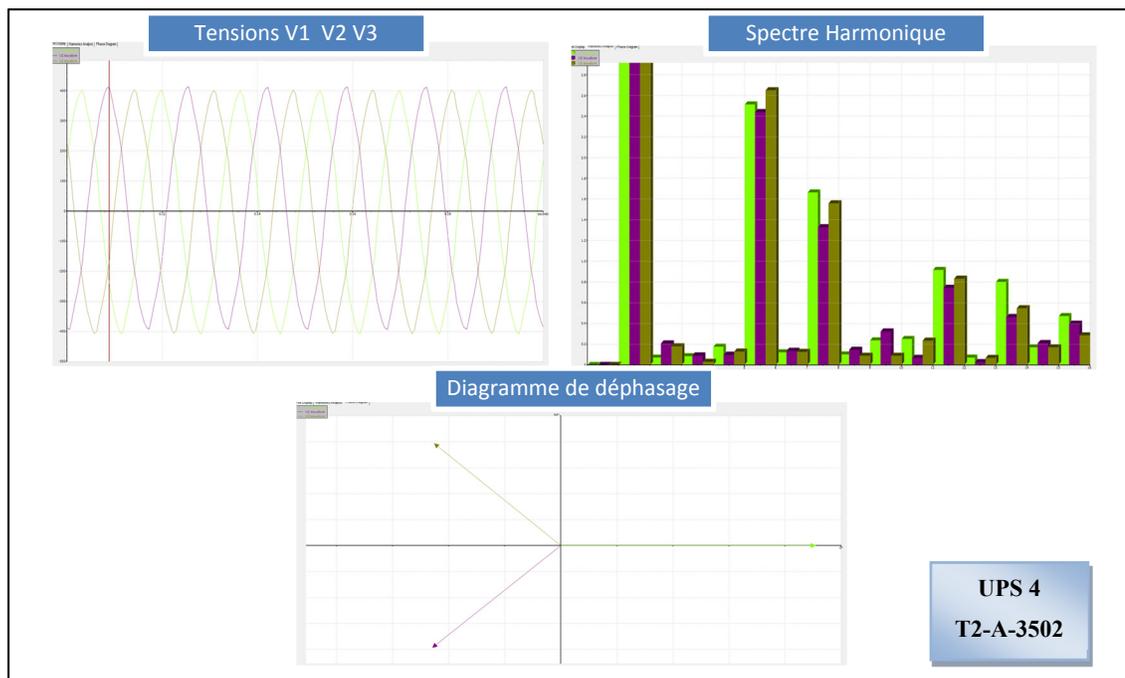


Figure 3.69 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du transfo T2-A-3502

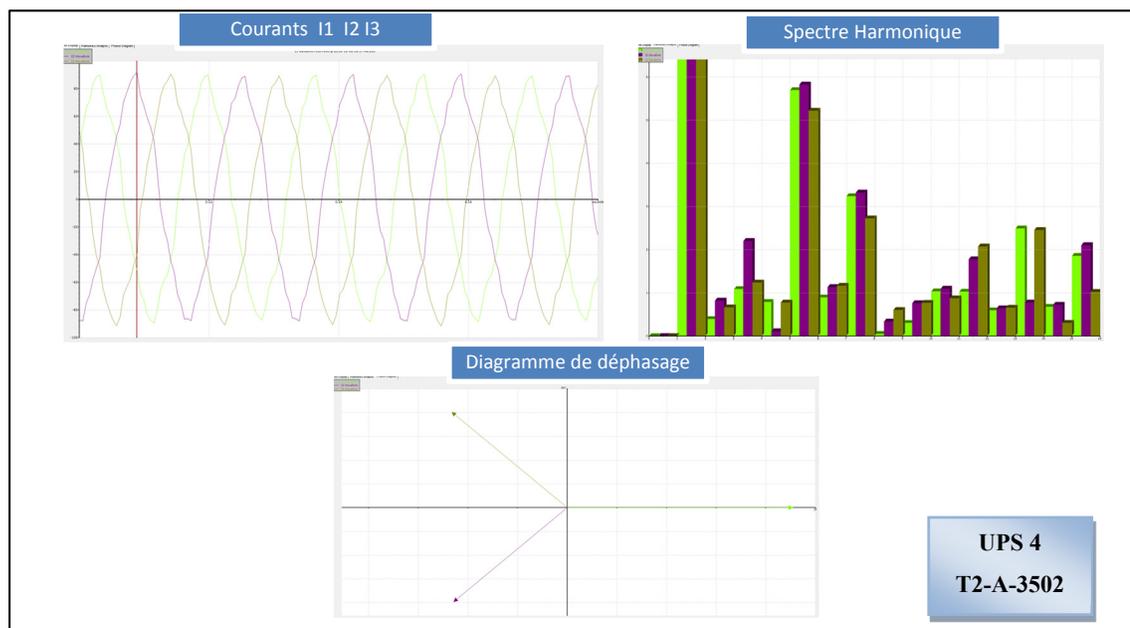


Figure 3.70 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du transfo T2-A-3502

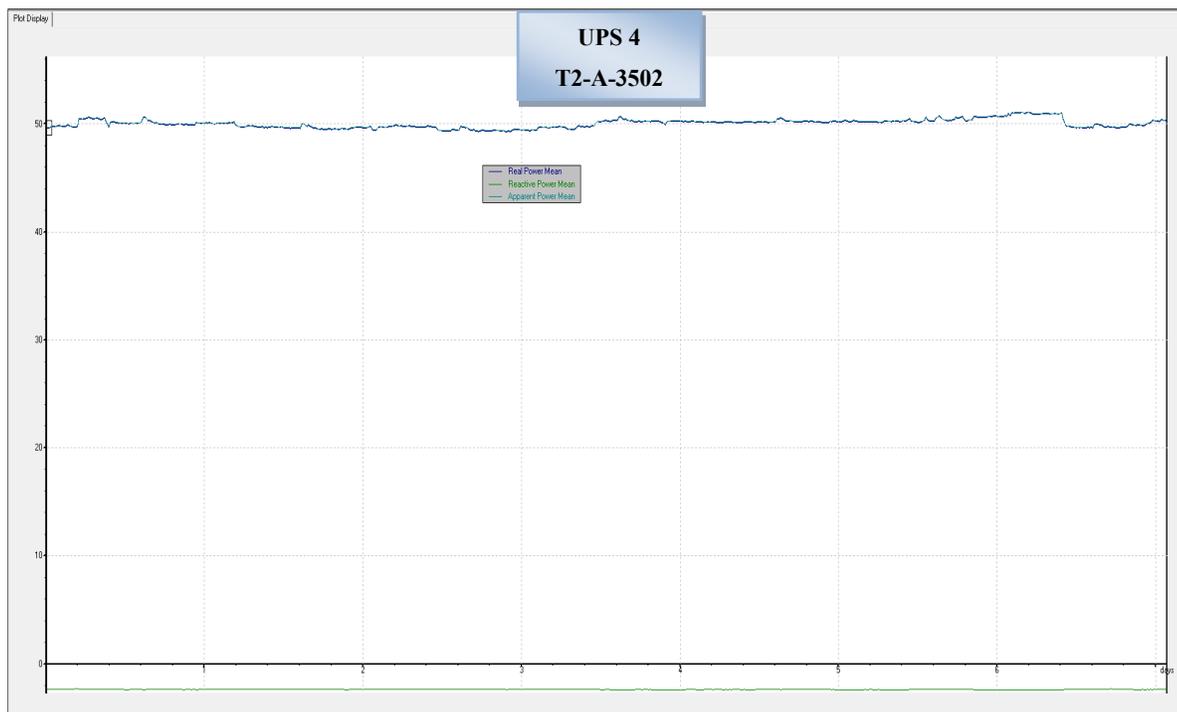


Figure 3.71 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du Transfos T2-A-3502

Pas très loin de la salle A-3502, plus précisément dans la salle A-3540, un transformateur dont le secondaire est couplé en zigzag, alimente deux panneaux. Il s'agit du transformateur 03-TR-01 qui alimente les panneaux (303) et (304).

Le panneau (303) est installé dans la même salle A-3540 et alimente la salle A-3539 ainsi que la prise présente dans la salle A-3613. D'un autre côté, le panneau (304) est installé dans la salle de dessus A-4500 et tel qu'il alimente deux autres panneaux (41) et (42).

Commençons par le panneau (41) qui est connecté à plusieurs charges telles qu'une imprimante installée dans la salle A-4000, une prise sur le toit, un ventilateur d'évacuation VE-6 localisé sur le toit et qui est fait pour aérer le quai de la cuisine et dont le contrôle switch est localisé dans A-4622. Il alimente en plus quatre autres ventilateurs d'évacuation. Le premier ventilateur est le VE-24 qui est installé sur le toit pour aérer les toilettes et tel que

son contacteur est présent dans la salle A-4610. Le deuxième ventilateur VE-31 qui est installé aussi sur le toit dont le but est d'aérer une salle électrique au rez-de-chaussée et tel que son contacteur est aussi installé dans la salle A-4610. Le troisième ventilateur qui est le VE-70 installé pareillement sur le toit et dont le contacteur est localisé dans A-4612 et qui s'occupe de l'aération la salle de dépôt 2. Finalement le ventilateur VE-23 qui est installé aussi sur le toit et conçu pour l'aération de la salle composite tel que son contacteur est présent dans A-4614.

Quant au panneau (42), il alimente une prise de toilette, la salle A-4524 et la thermopompe TP 38 installée au local A-4576.1.

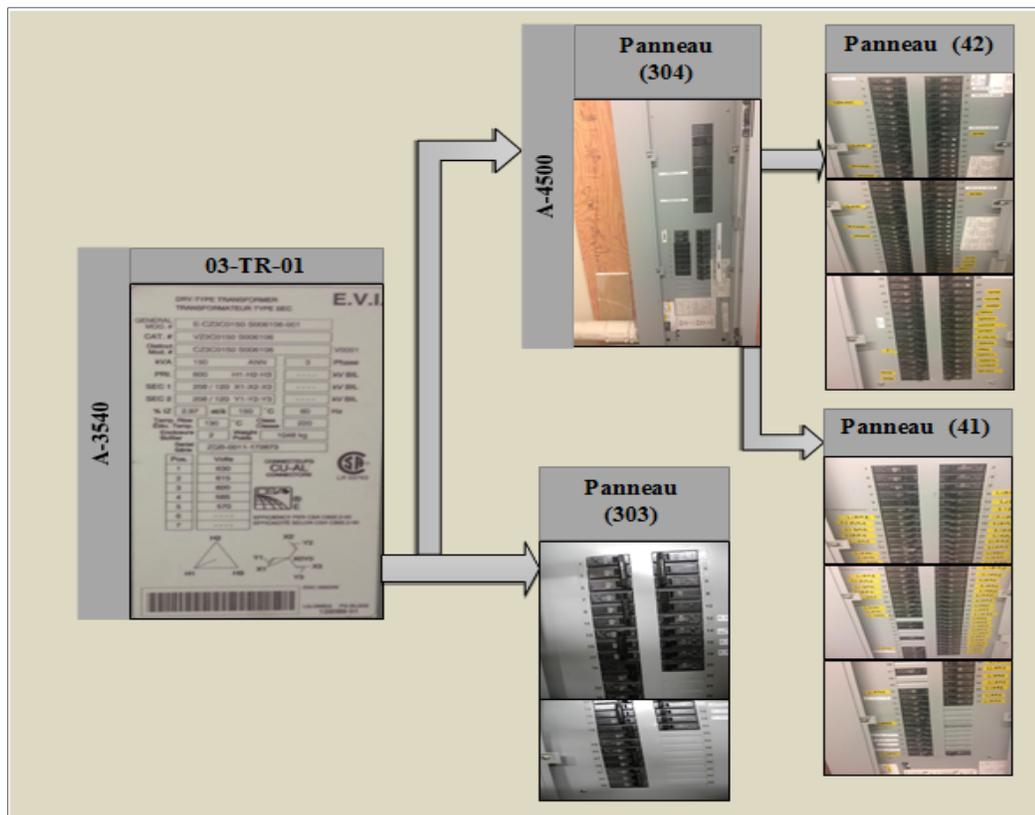


Figure 3.72 Charge totale alimentée par le transformateur 03-TR-01

Ainsi nous présentons les mesures du panneau (303) et du panneau (304) donnant la charge totale du transformateur 03-TR-01.

Il faut juste noter que les mesures des courants et puissances obtenues pour le panneau (304) doivent être multipliées par deux vu que nous n'étions capables d'insérer les pinces de mesures qu'autour d'un seul câble par phase alors que chaque phase comporte deux câbles.

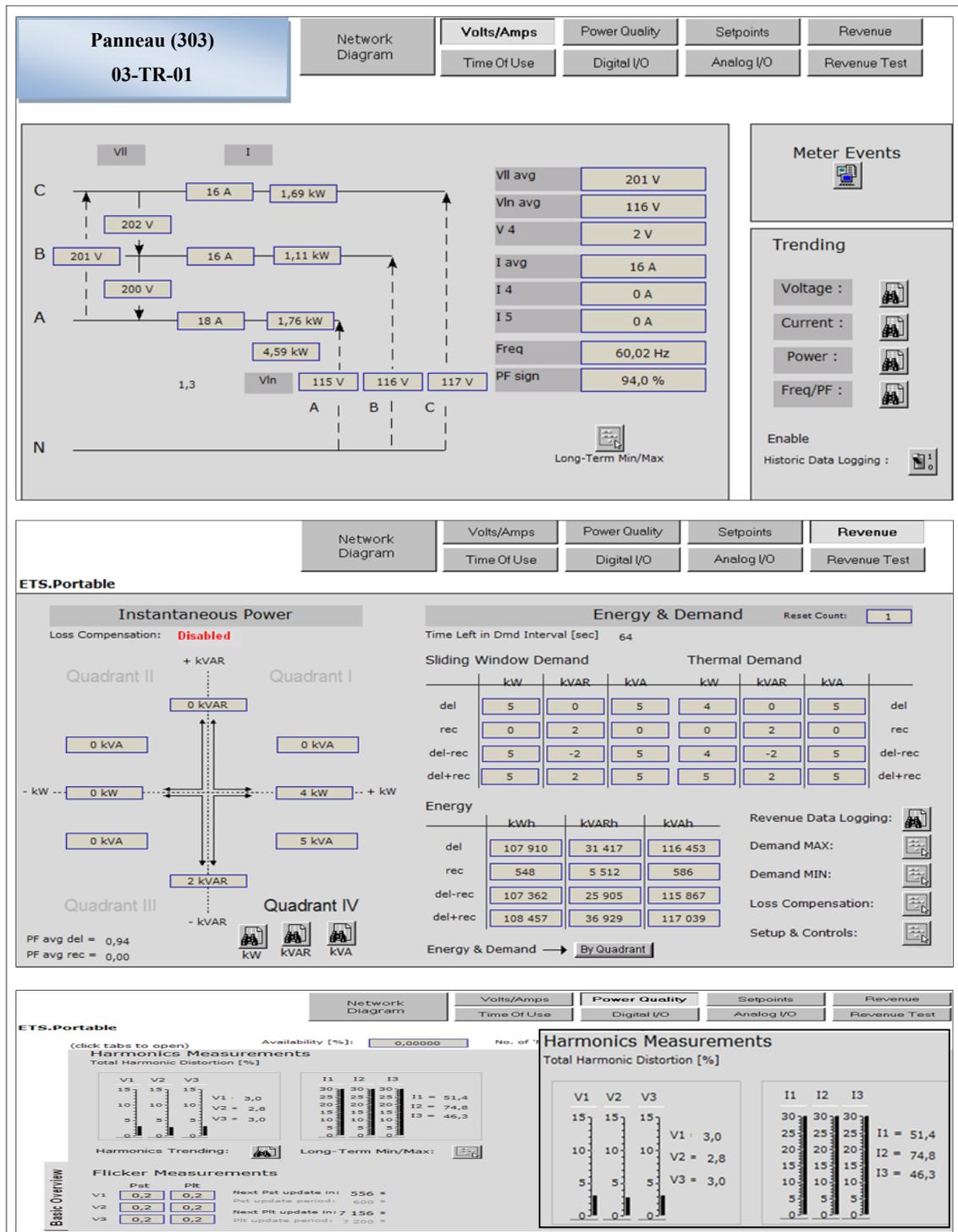


Figure 3.73 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (303) connecté au 03-TR-01

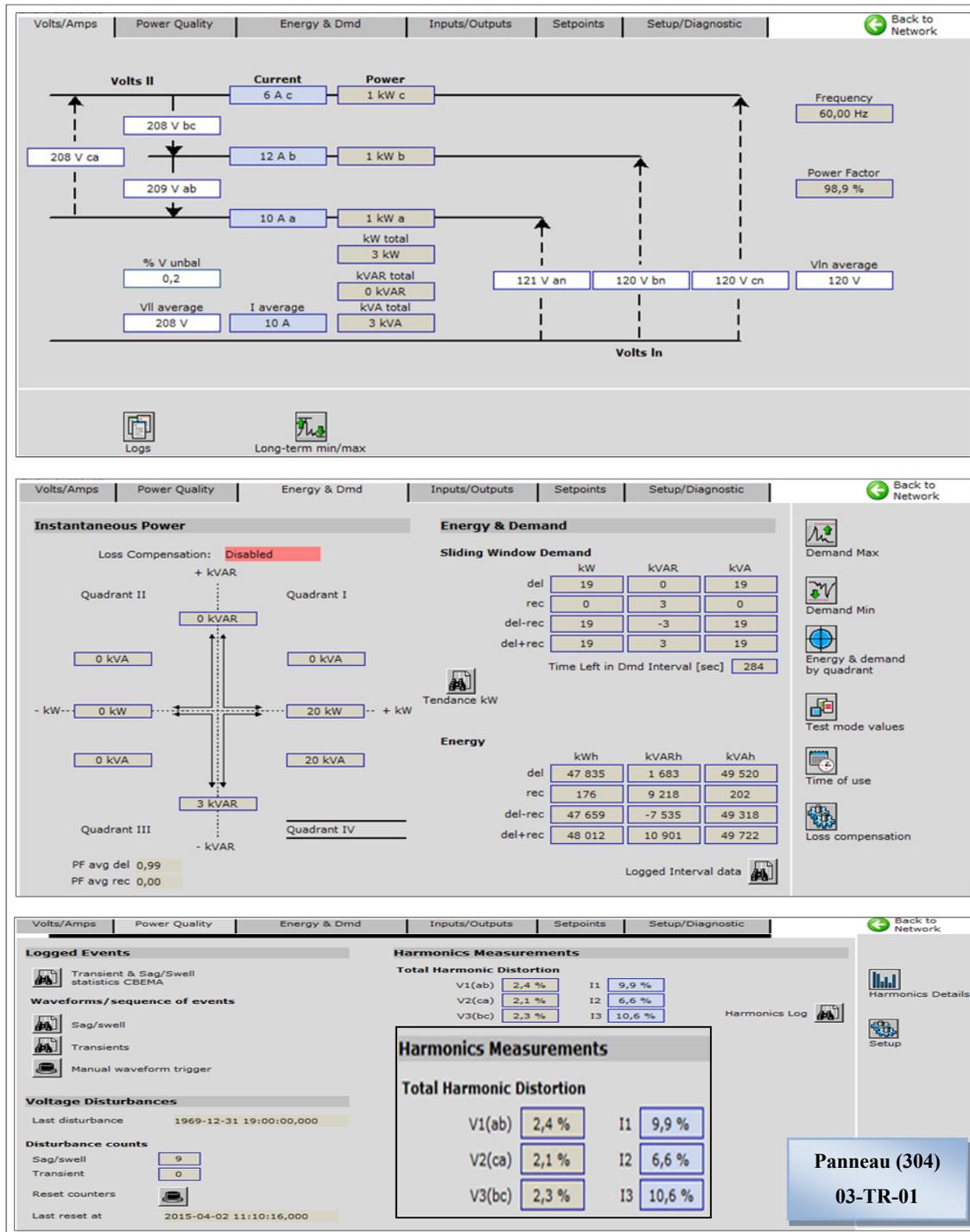


Figure 3.74 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (304) connecté au 03-TR-01

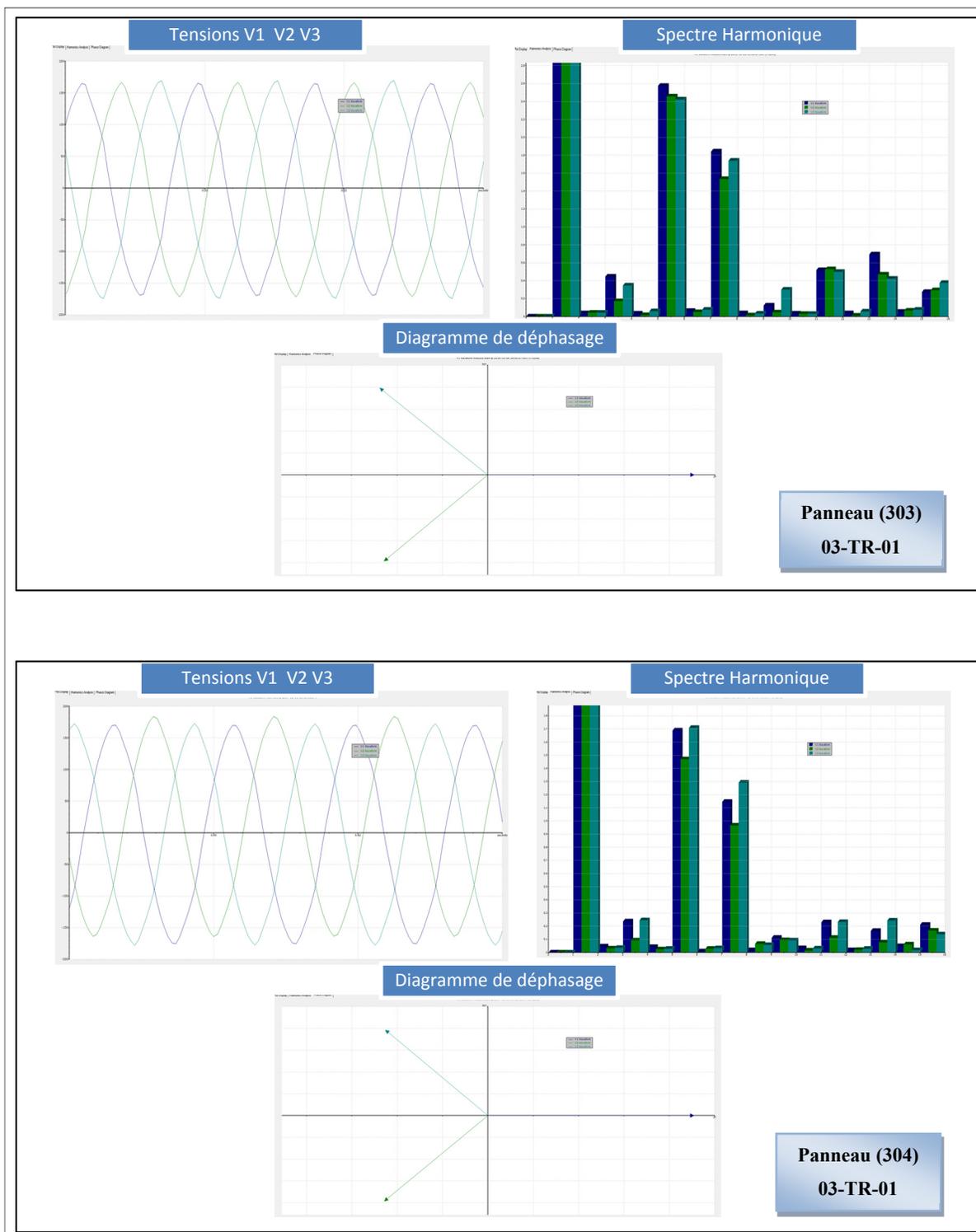


Figure 3.75 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des panneaux (303) et (304) connectés au transfo 03-TR-01

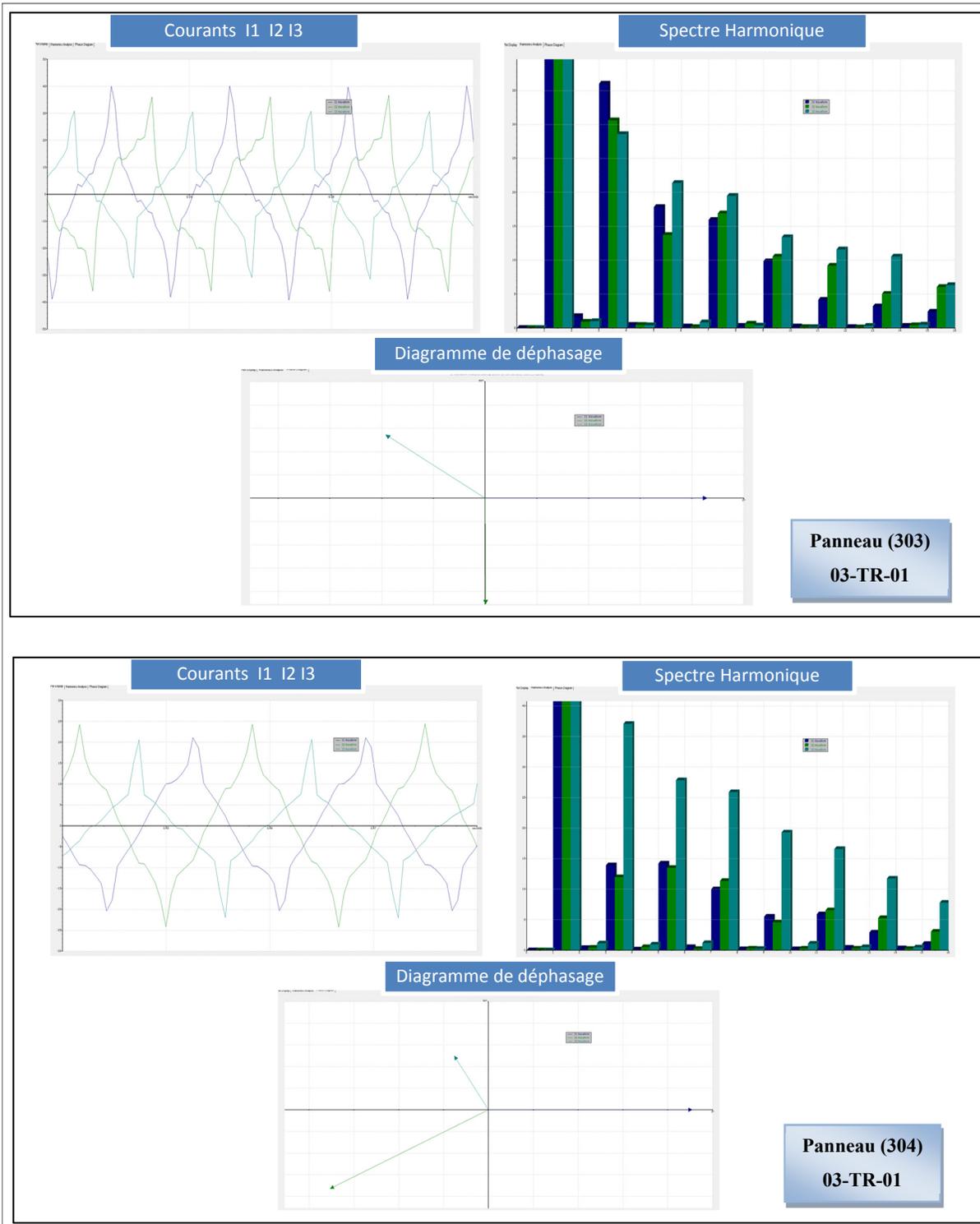


Figure 3.76 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des panneaux (303) et (304) connectés au transfo 03-TR-01

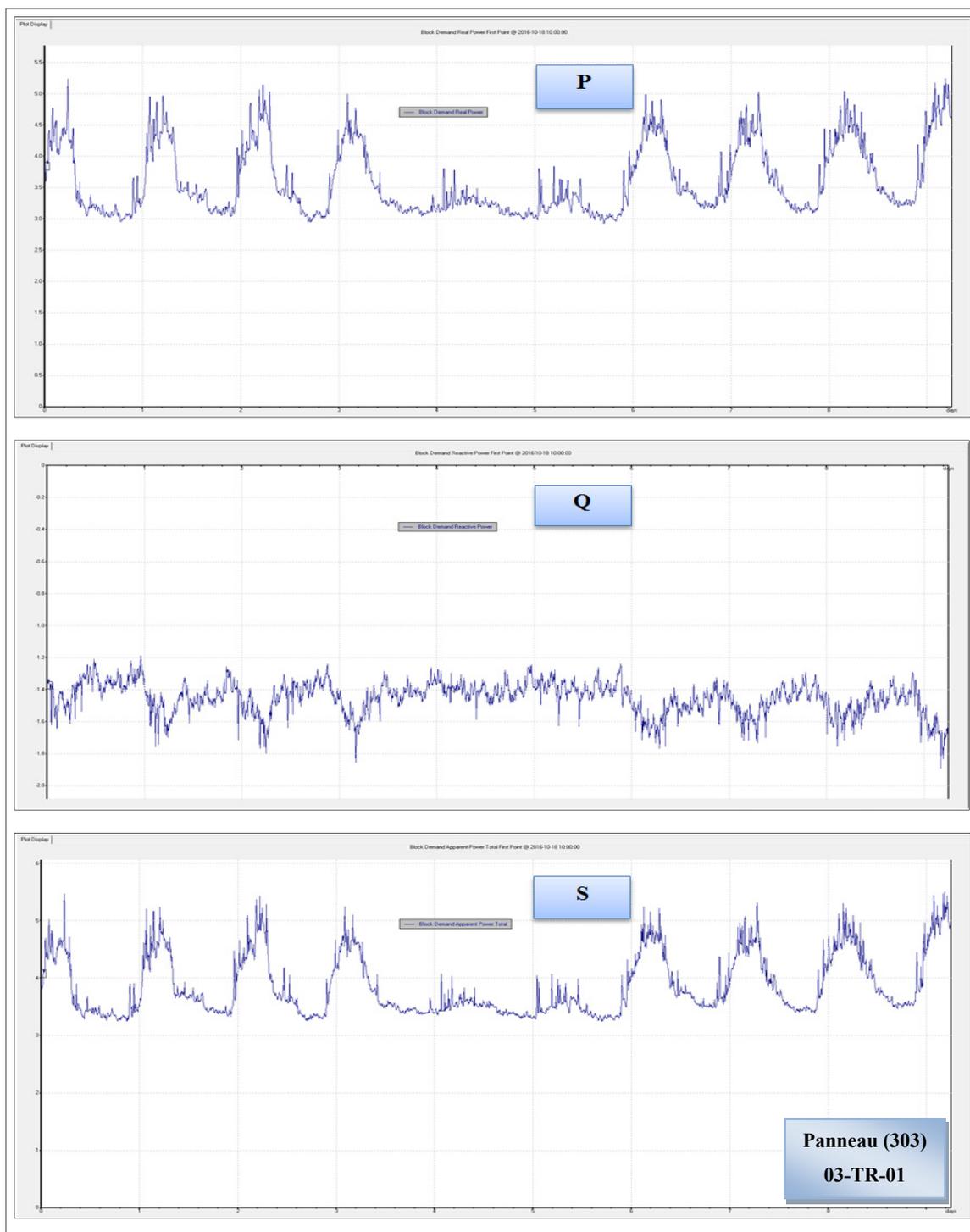


Figure 3.77 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (303) connecté au transfo 03-TR-01

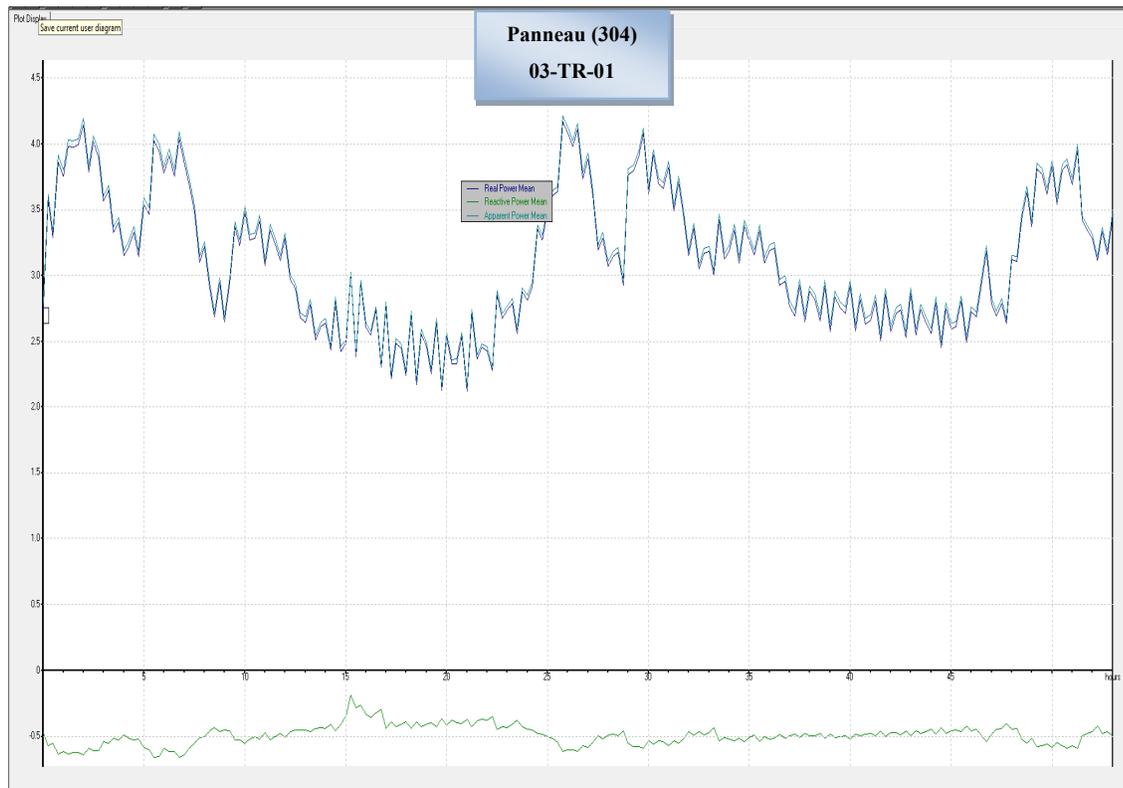


Figure 3.78 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (304) connecté au transfo 03-TR-01

En poursuivant les mesures en temps réel, nous avons rencontré un transformateur similaire au transformateur 03-TR-01. En effet, il s'agit du transformateur 03-TR-02 qui a la même puissance apparente nominale que le transformateur 03-TR-01 et qui est égale à 150kVA et dont le secondaire est en couplage zigzag. Ainsi, il comporte deux sorties qui sont connectées aux deux panneaux ; le panneau (307) et le panneau (308).

Le panneau (307) alimente le panneau (34) qui alimente les prises caniveaux dans les locaux A-3456, A-3458, A-3460 et A-3462. Il alimente aussi les prises des bureaux A-3400 et les prises des locaux A-3430, A-3450, A-3452, A-3453, A-3456.1, A-3461, A-3464, A-3466, A-3478, A-3484 et A-3489. Aussi, des prises pour les TV installés dans les salles A-3454 et A-

3484, des prises des tables et une prise pour l'imprimante qui sont installés dans la salle A-3484 sont alimentées par le panneau (34).

De plus, Le panneau (308) alimente trois autres panneaux qui sont (43), (44) et (45). Ces trois panneaux alimentent plusieurs charges parmi lesquelles nous pouvons mentionner les prises et la boîte au plafond des bureaux A-4420, A-4422, A-4424, A-4426, A-4428 et A-4430, les prises caniveaux de la salle A-4400, les prises des salles A-4514, A-4515, A-4516, A-4404, A-4410, A-4412, A-4506 et A-4508. Ils alimentent aussi les prises de la salle de télécom A-4509, les prises de la salle A-4401 pour le réfrigérateur, les prises pour les tours d'eau 1, 2, et 3 et les prises de nettoyage.

D'un autre côté, ces panneaux fournissent aussi de l'énergie pour l'éclairage extérieur et pour assurer la déconnexion de la machine installée dans la salle A-4401. Ils alimentent de même plusieurs ventilateurs d'évacuation. Le premier est le VE-76 dont le contacteur est dans A-4406 et dont le but est d'assurer l'aération de l'armoire qui contient des produits chimiques et qui est localisée dans la salle A-4401.2. Le deuxième est le VE-77, son contacteur est localisé dans A-4406 et qui a été installé pour aérer de même une autre armoire dans A-4401.2. Le troisième est le VE-78 qui s'occupe de l'aération de la hotte installée dans la salle A-4401.2 et tel que son contacteur est présent dans A-4401. Le dernier ventilateur d'évacuation alimenté par ces trois panneaux est le VE-71 pour l'aération des toilettes du rez-de-chaussée et dont le contacteur est installé dans A-4579. Notons que tous ces ventilateurs mentionnés ci-dessus sont localisés sur le toit. Autres charges alimentées par ces panneaux sont les pompes de filtration pour les tours d'eau PF-1, PF-2, PF-3 et PF-4.

Le transformateur 03-TR-02 ainsi que les panneaux connectés à celui-ci sont présentés par la figure 3.79.

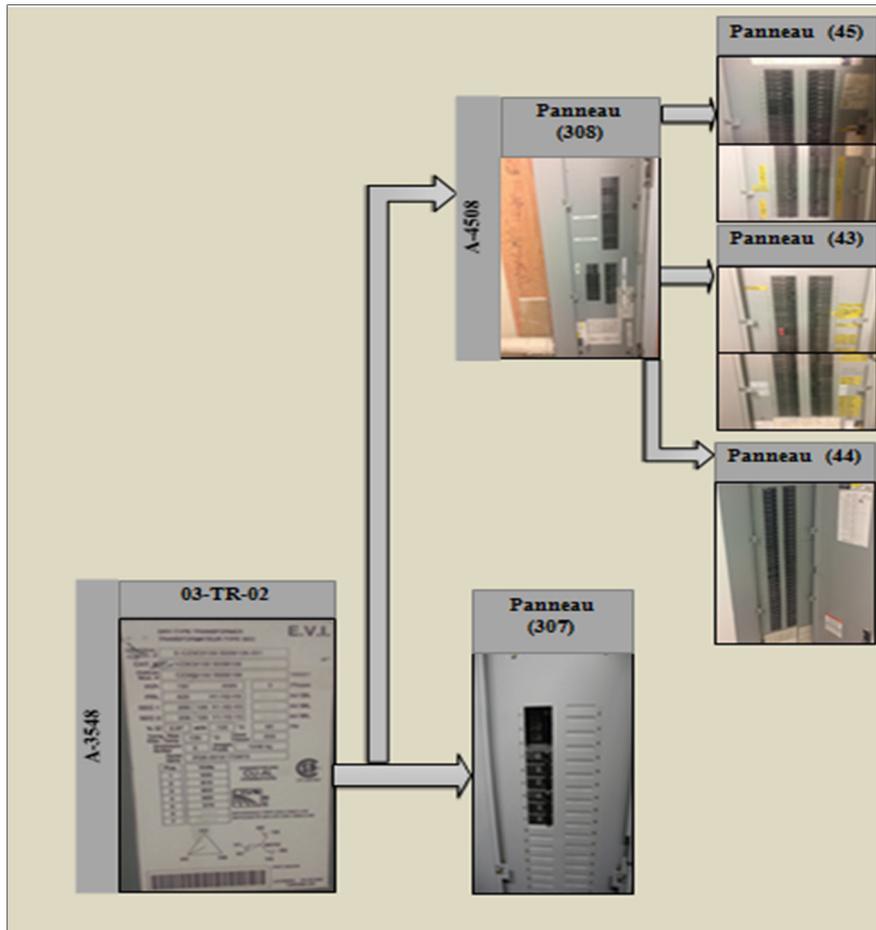


Figure 3.79 Charge totale alimentée par le transformateur 03-TR-02

La mesure de la charge des deux panneaux (307) et (308) donne la charge totale du transformateur 03-TR-02, ainsi nous présentons les résultats expérimentaux obtenus suite aux mesures effectuées pour chaque panneau. Pour les mesures obtenues pour le panneau (308) il faudrait les multiplier par le facteur deux puisque les pinces de mesures n'ont pu mesurer qu'un seul câble et non les deux entrants par phase.

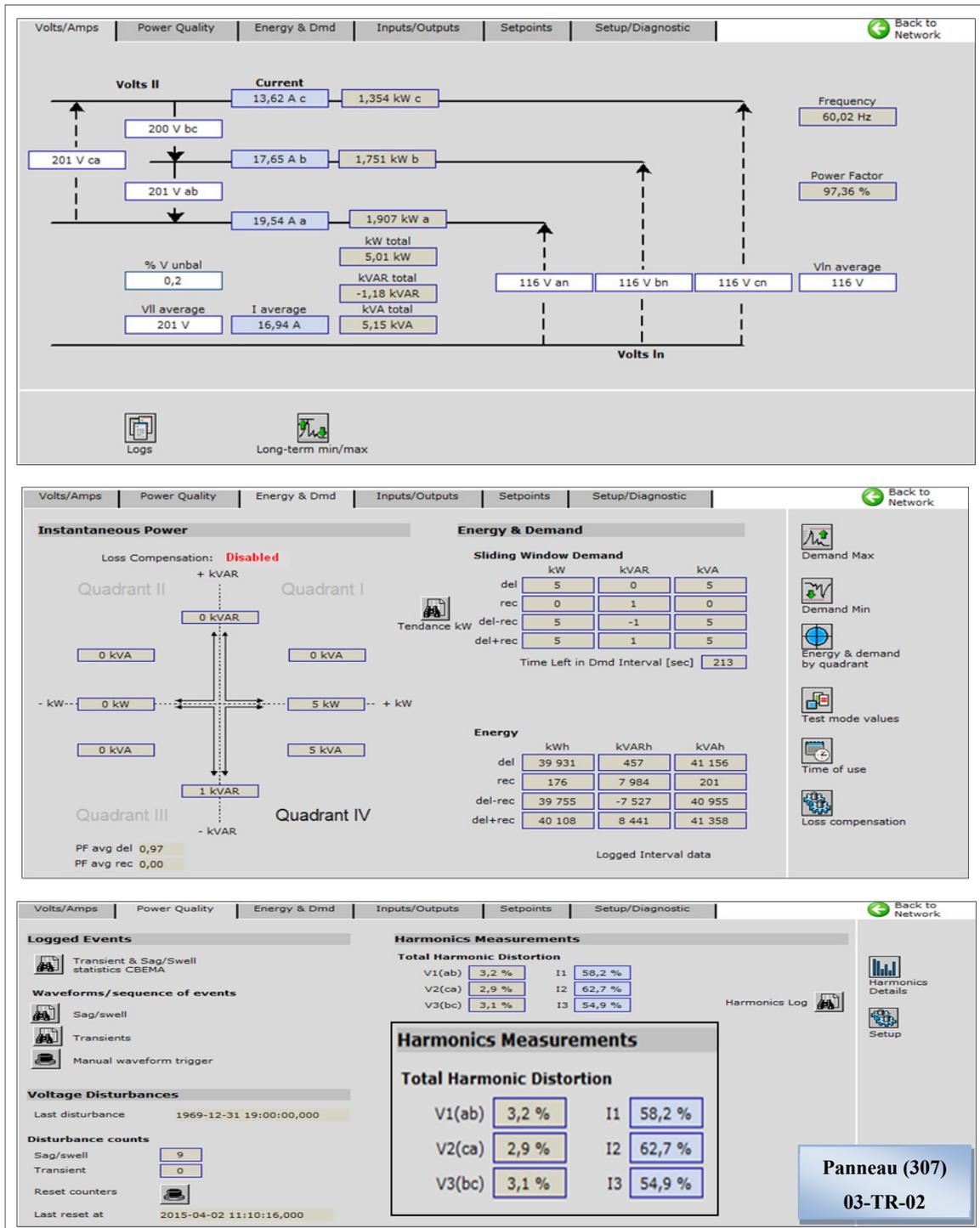


Figure 3.80 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (307) connecté au 03-TR-02

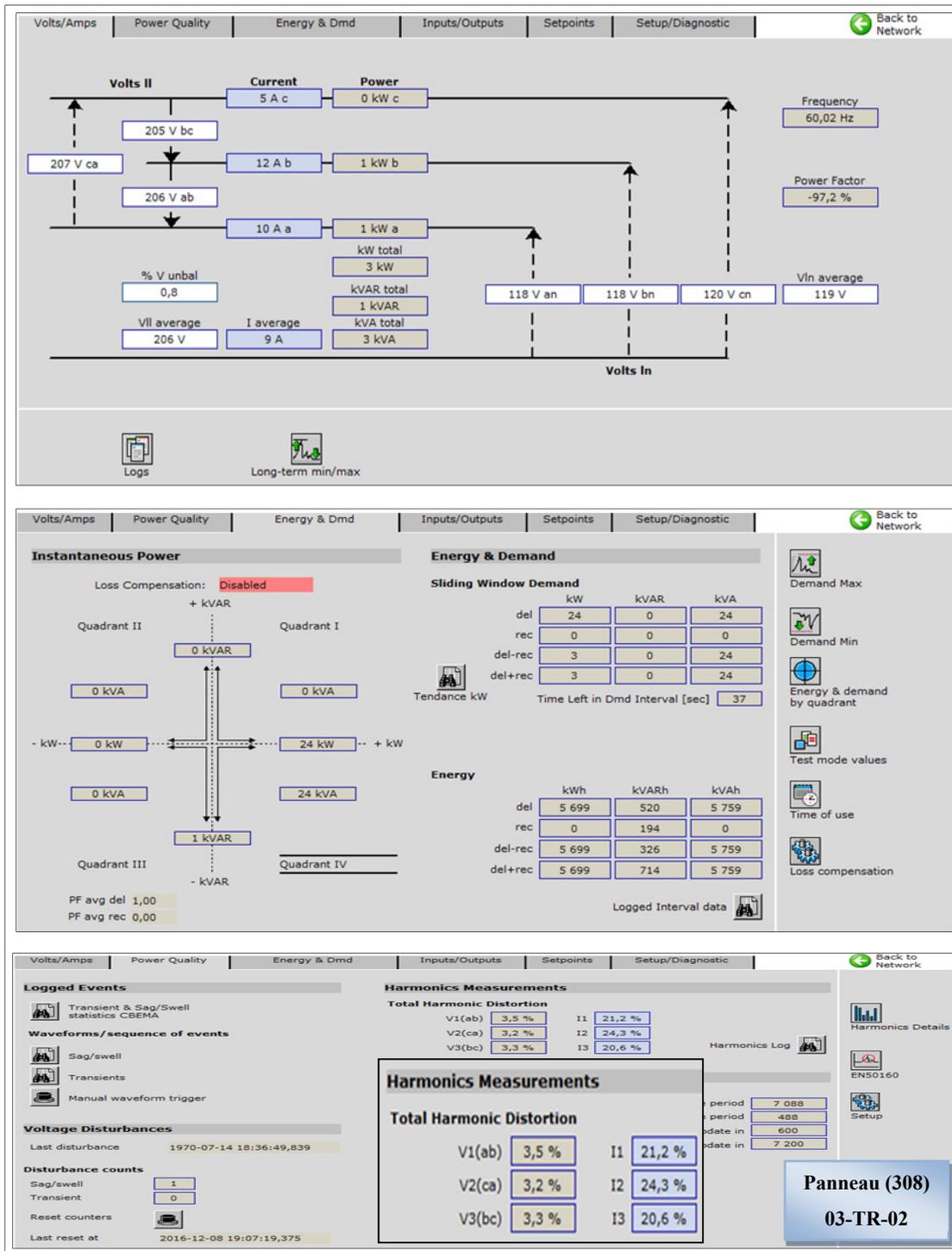


Figure 3.81 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (308) connecté au 03-TR-02

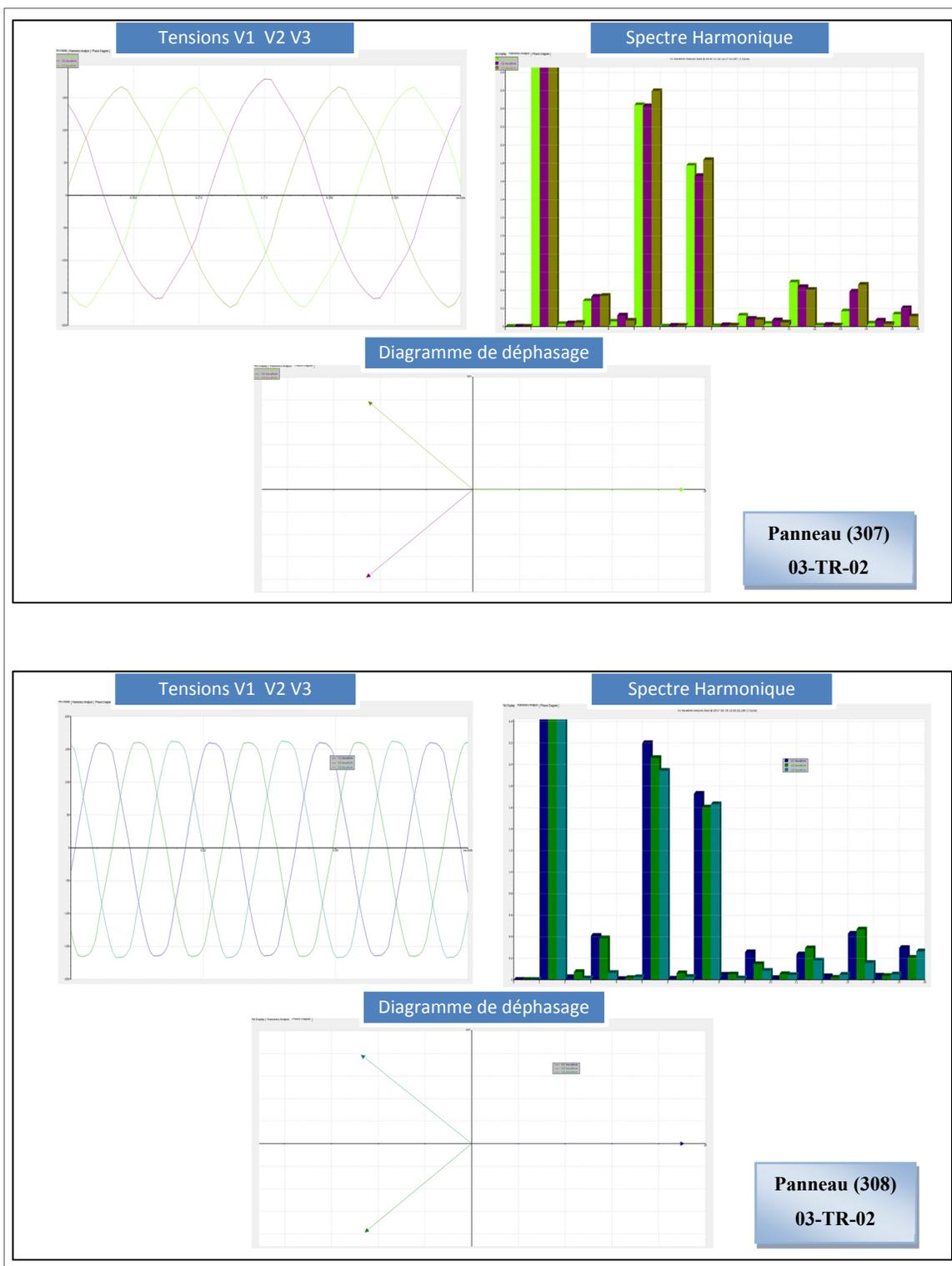


Figure 3.82 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des panneaux (307) et (308) connectés au transfo 03-TR-02

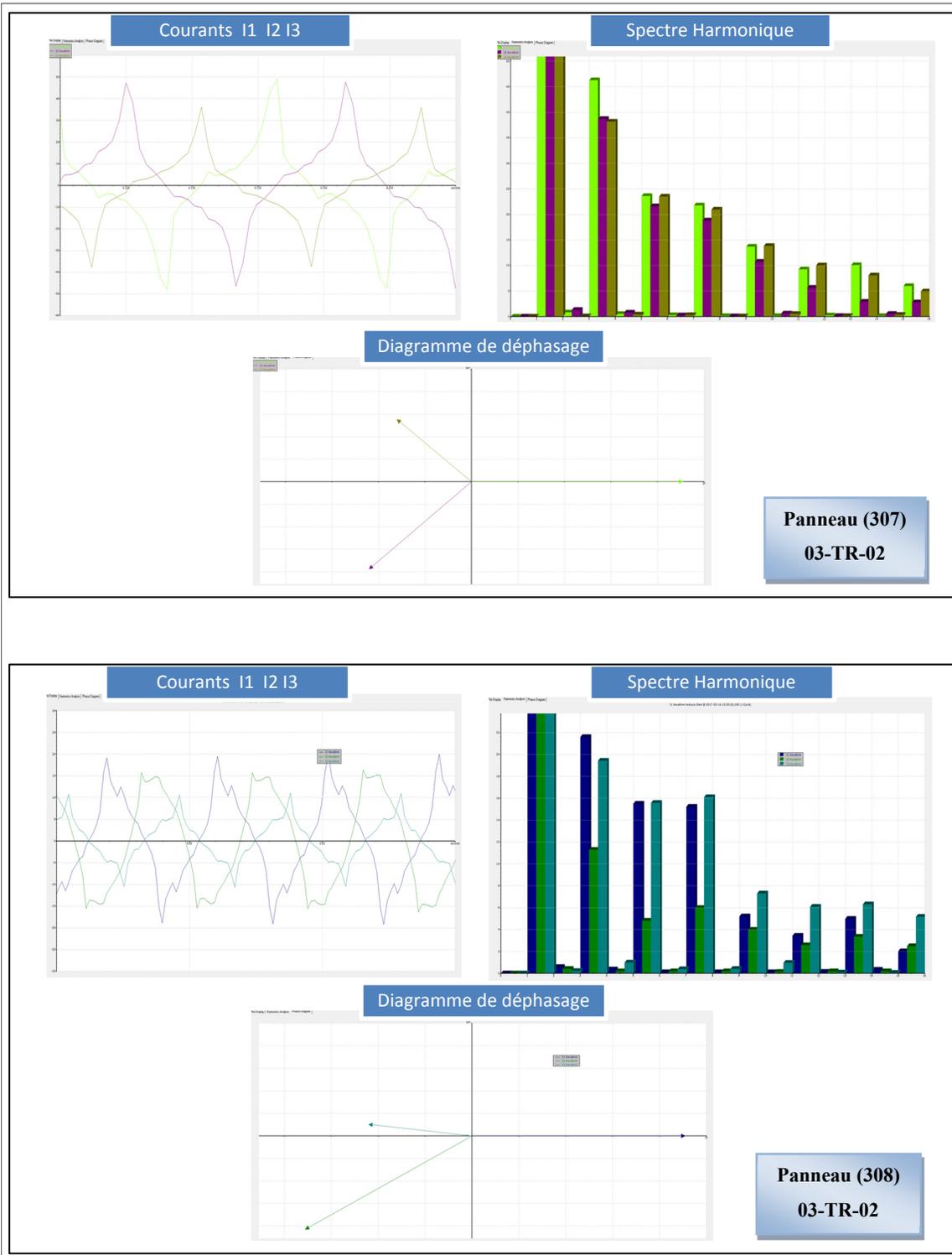


Figure 3.83 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des panneaux (307) et (308) connectés au transfo 03-TR-02

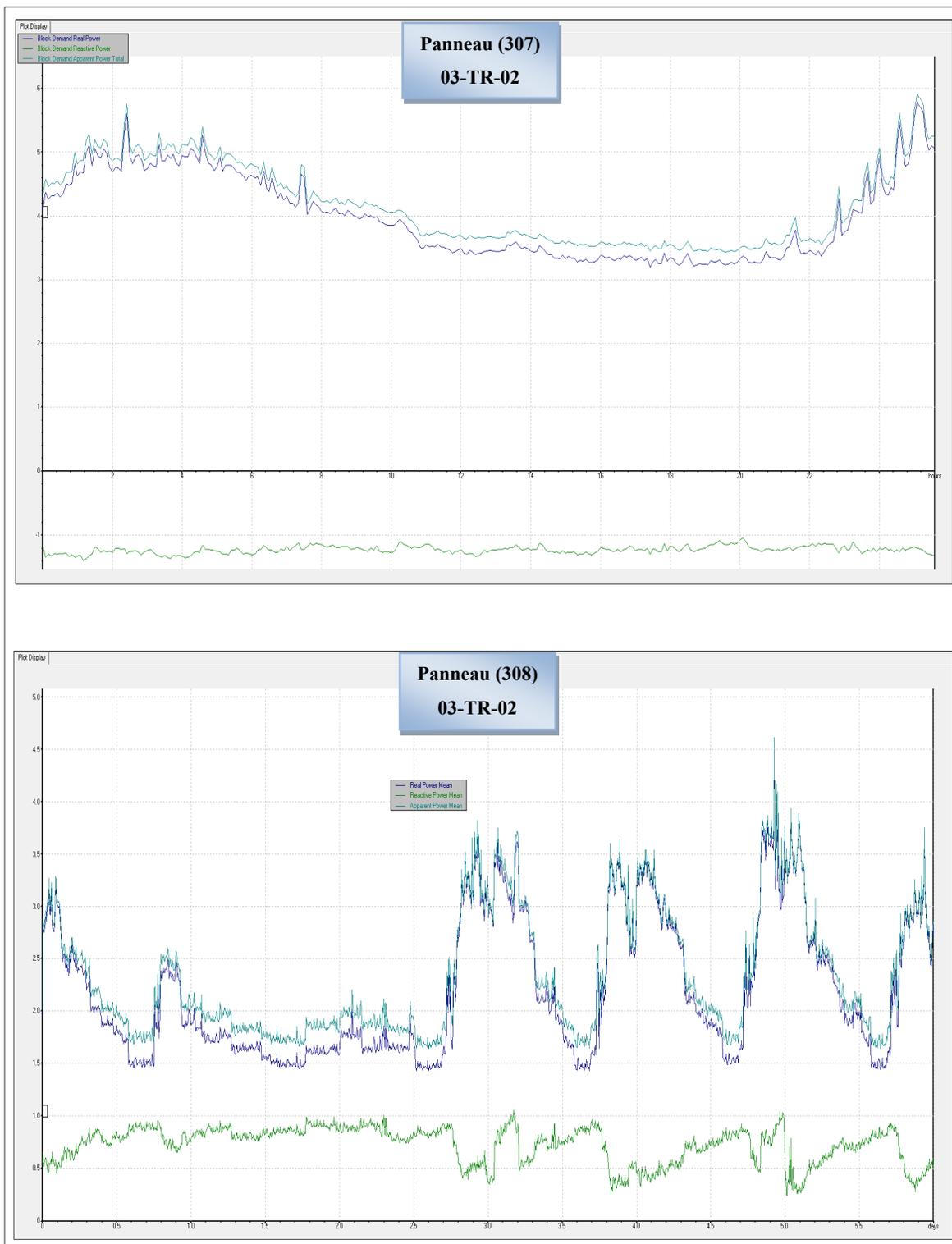


Figure 3.84 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge des panneaux (307) et (308) connectés au transfo 03-TR-02

En plus du transformateur 03-TR-02, la salle A-3548 contient un deuxième transformateur T2-A-3548 qui a été évoqué précédemment en mentionnant qu'il a été alimenté par le contacteur 03-CO-01 alimenté par le bypass qui est alimenté à son tour par le transformateur T2-A-3502 et connecté à l'UPS 4 installée dans la salle A-3502.

Le transformateur 03-TR-02 possédant une puissance apparente nominale égale à 112.5kVA, alimente les deux panneaux (35) et (36) qui sont installés dans la salle des serveurs A-3550 comme le montre la figure 3.85.

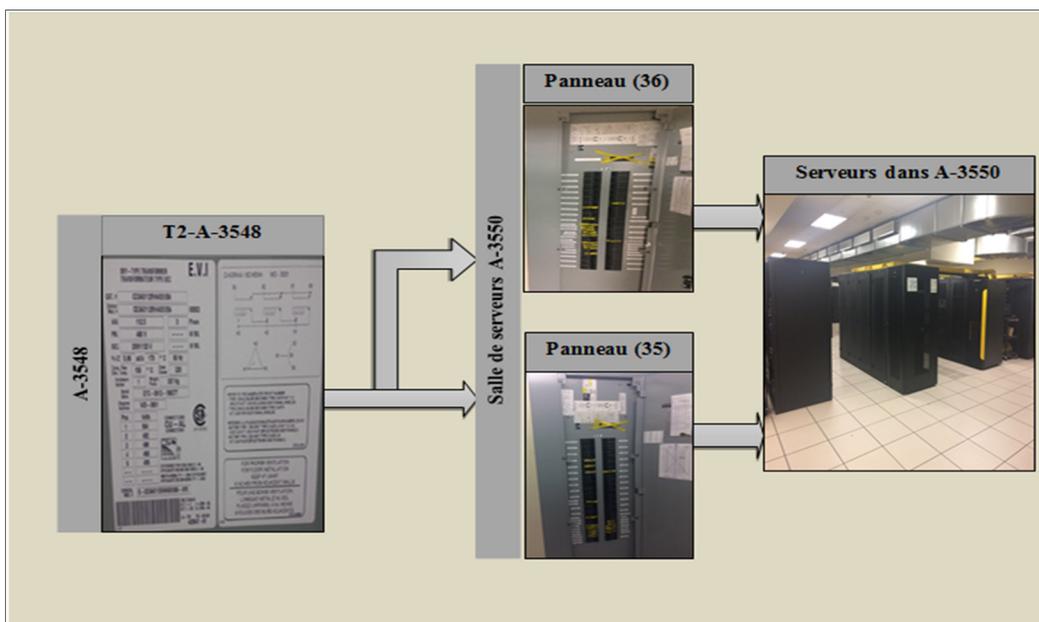


Figure 3.85 Charge totale connectée au transformateur T2-A3548

Les deux panneaux (35) et (36) alimentent la partie restante des cabines de serveurs installés dans la salle A-3550.

Ainsi, à l'aide de l'analyseur, nous avons mesuré la charge totale du transformateur T2-A-3548 et ce, tout en mesurant la charge de chacun des deux panneaux (35) et (36). Les résultats obtenus sont comme suit :

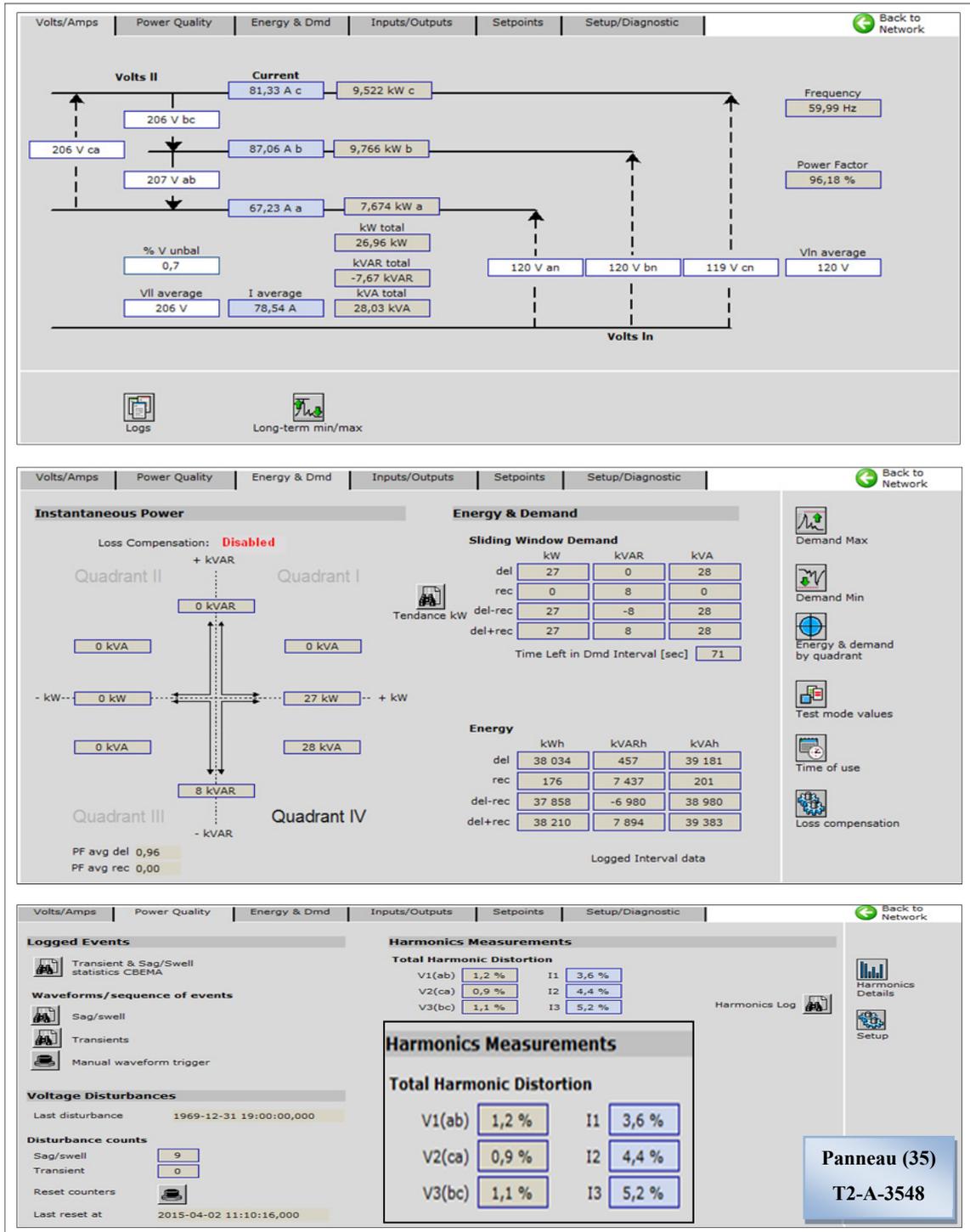


Figure 3.86 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (35) connecté au T2-A-3548

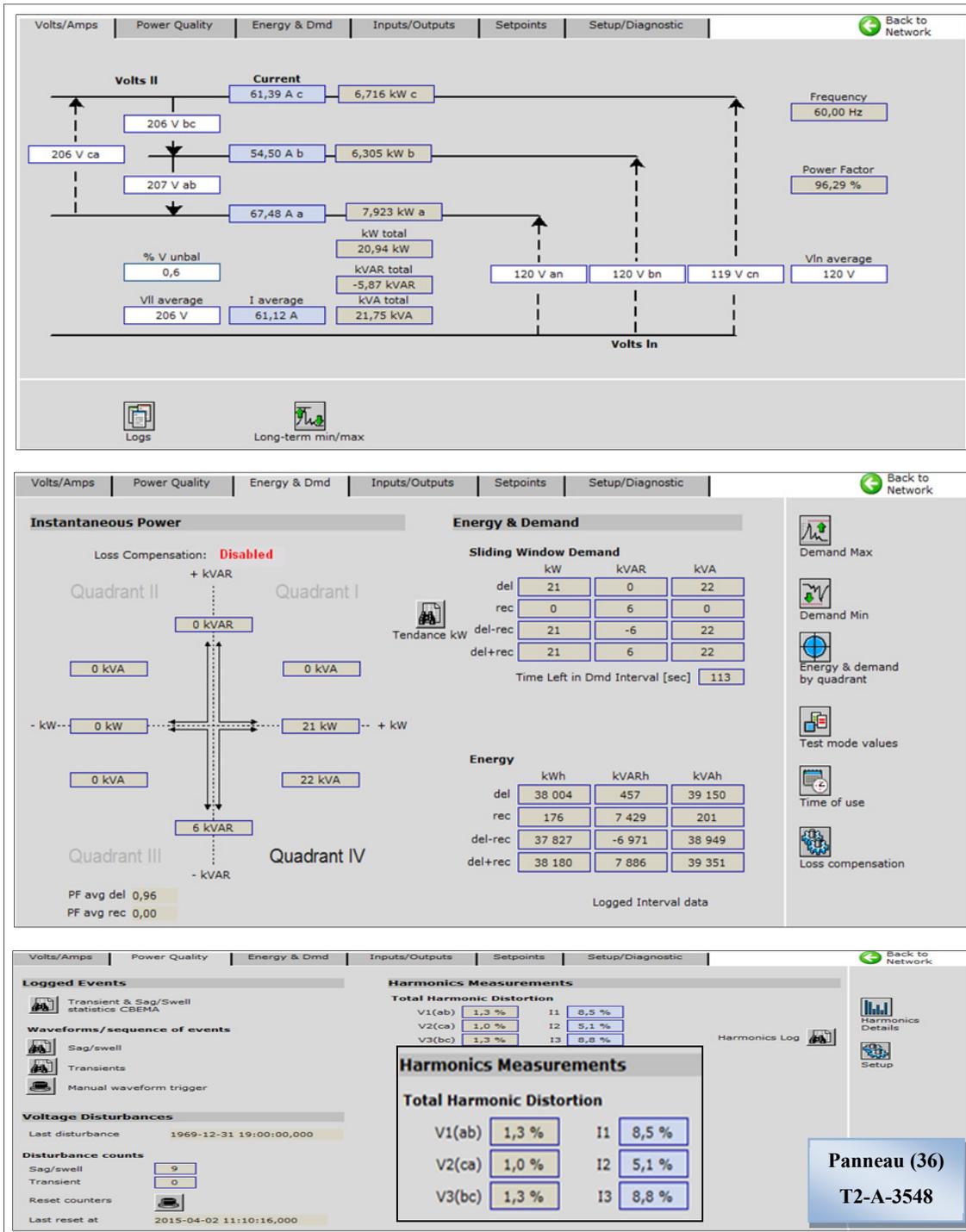


Figure 3.87 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (36) connecté au T2-A-3548

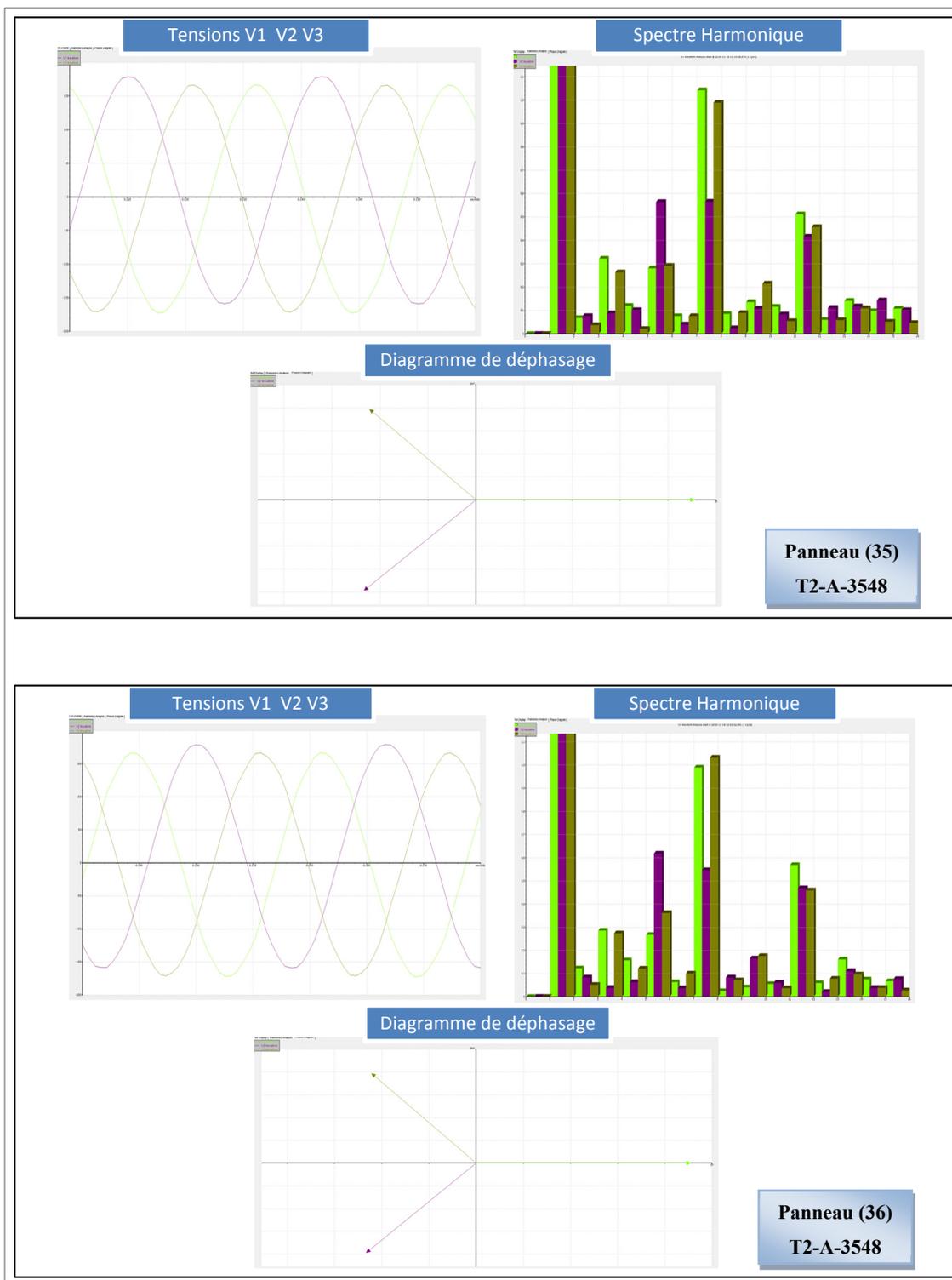


Figure 3.88 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge des panneaux (36) et (37) connectés au transfo T2-A-3548

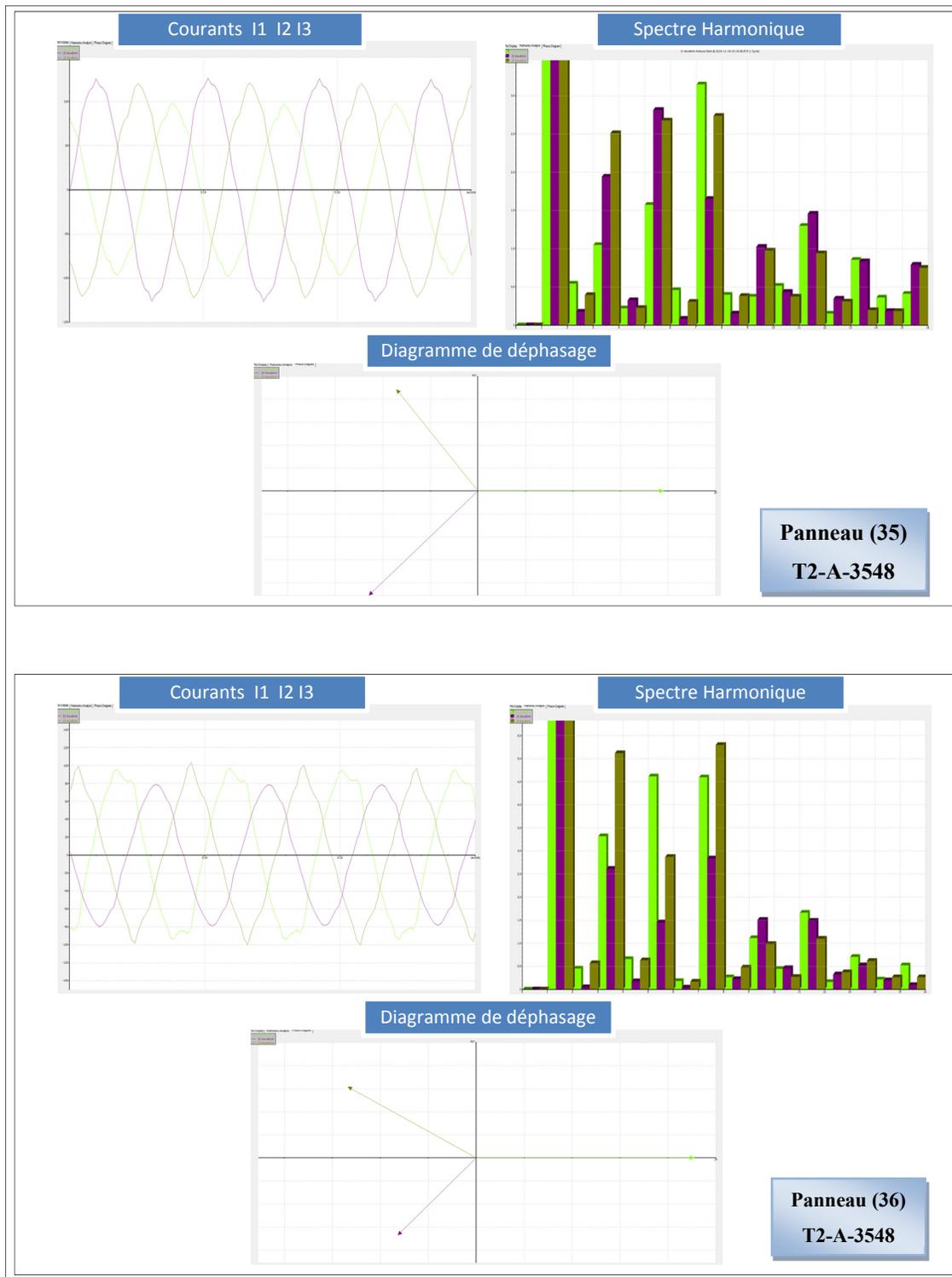


Figure 3.89 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge des panneaux (36) et (37) connectés au transfo T2-A-3548

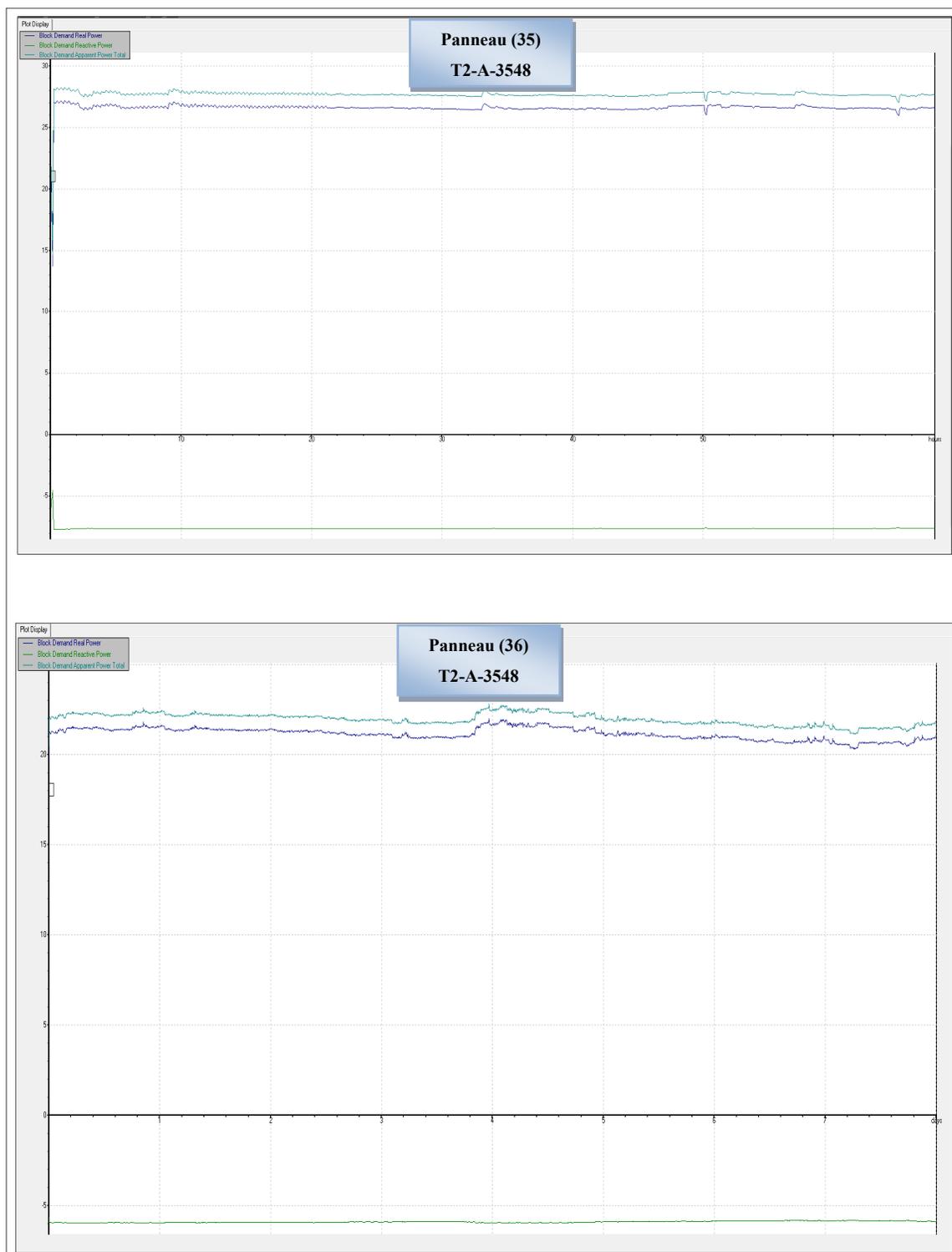


Figure 3.90 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge des panneaux (35) et (36) connectés au transfo T2-A-3548

Nous avons continué avec les mesures en temps réel de la charge totale des transformateurs de grande puissance installés au 3^{ème} étage. Il reste deux transformateurs dont l'un est installé dans la salle A-3853 et le deuxième est installé dans la salle A-3886.

Pour le transformateur qui est installé au local A-3853, il s'agit du TPPC3 qui alimente le panneau PPC3. Ce dernier est connecté à plusieurs autres panneaux qui sont le panneau M3, le panneau E3, le panneau K3, le panneau L3 et le panneau (37).

Ces panneaux alimentent de multiples prises telles que : les prises des salles A-3108, A-3110, A-3121, A-3122, A-3176, A-3850 et A-3862 et les prises pour le couloir près des toilettes A-3854 et A-3862. De plus, ils alimentent le moteur de ventilation pour différents ventilateurs d'évacuation. Parmi ces ventilateurs, il est possible de mentionner le VE-10 qui est localisé au toit 1 et dont le démarreur est installé au local A-3880, le VE- 42 pour aérer l'ascenseur ASC.1 et tel que son contacteur est présent dans A-4000, le VE-45 pour aérer la salle A-3158, le VE- 43 pour aérer l'ascenseur ASC.2 et dont le contacteur se trouve dans le local A-4004 et le VE- 44 pour aérer le rotor et dont le contacteur se trouve dans le local A-4012.

Le panneau PPC3 alimente aussi la pompe Glyco, le moteur M3 pour l'évier, les séchoirs à main installés aux toilettes A-3854 et A-3862, l'abreuvoir et pour finir les thermopompes TP-18 et TP-18 dans les locaux A-3884 et A-3892. En plus de ces panneaux, PPC3 alimente une soudeuse installée dans la salle A-3650.

Nous pouvons voir le transformateur TPPC3 et le panneau PPC3 dans la figure 3.91.

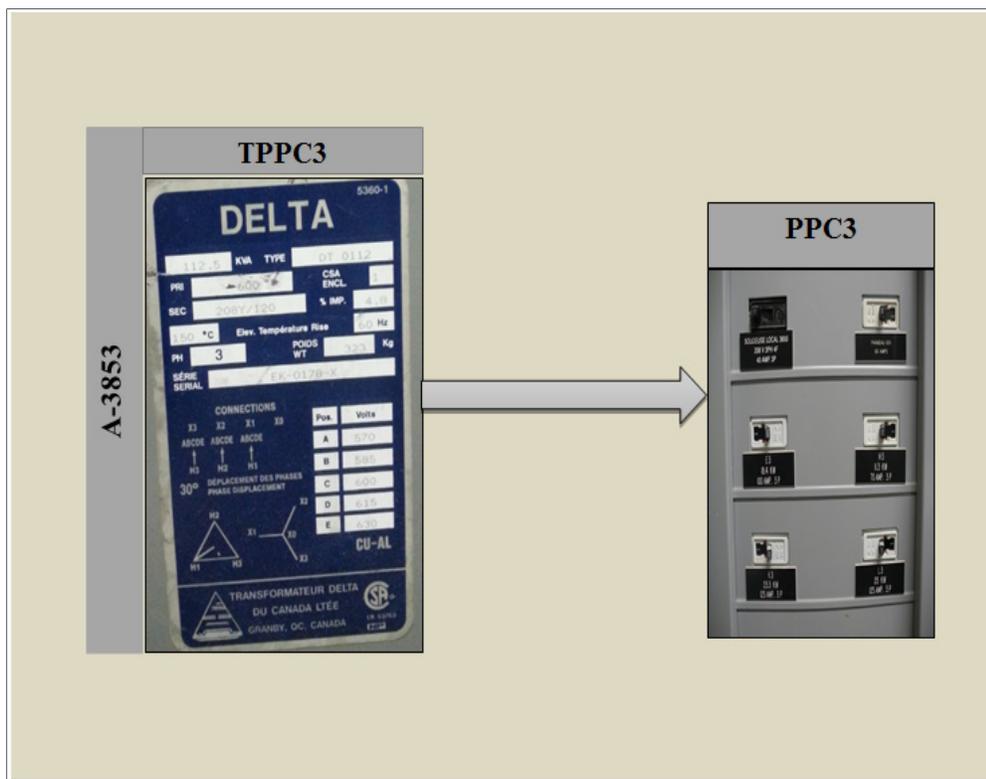


Figure 3.91 Charge alimentée par le transformateur TPPC3

Suite aux mesures en temps réel de la charge totale du panneau PPC3, nous avons obtenu les résultats expérimentaux qui sont visualisés par les figures 3.92, 3.93, 3.94 et 3.95.

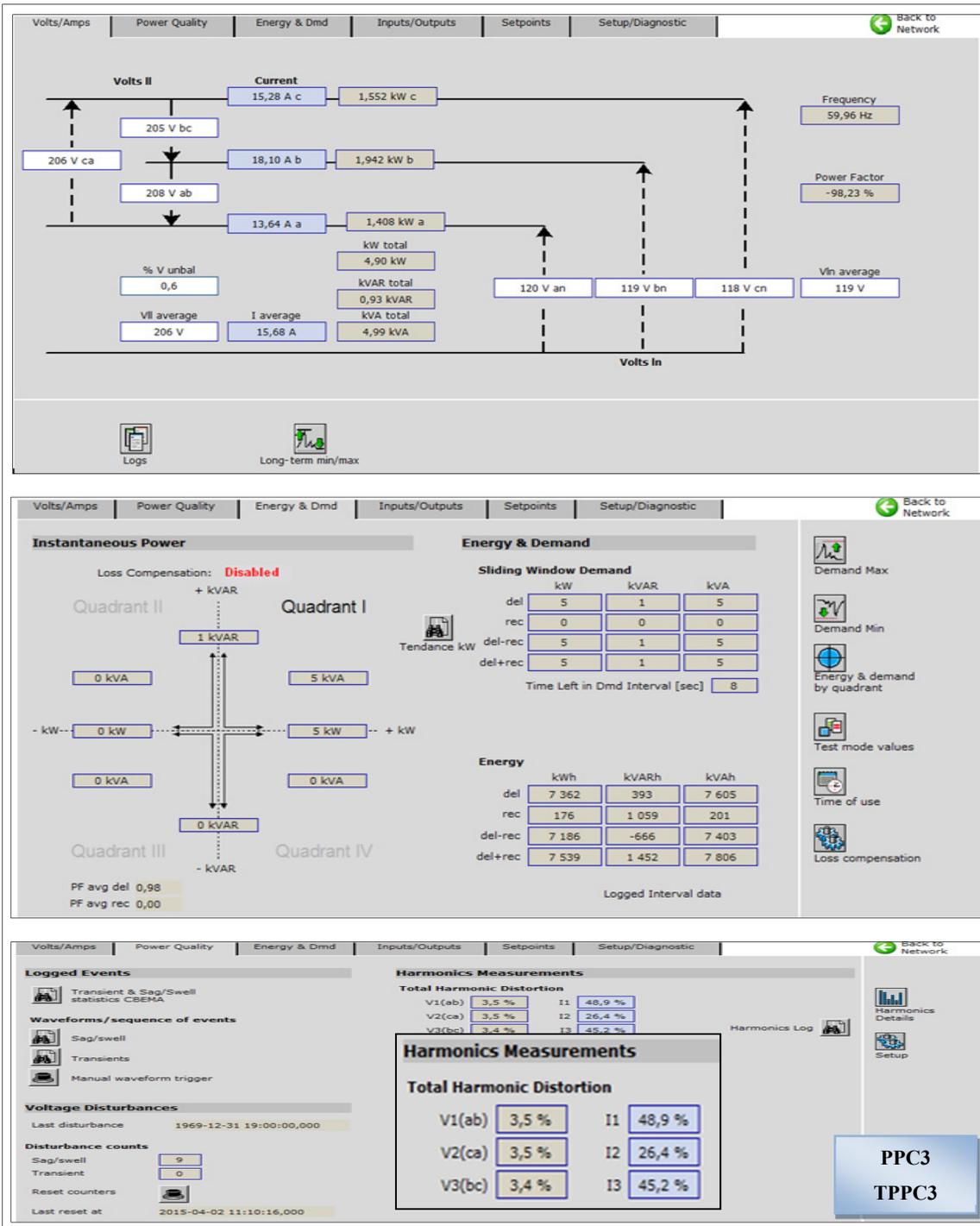


Figure 3.92 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPC3 connecté au TTPC3

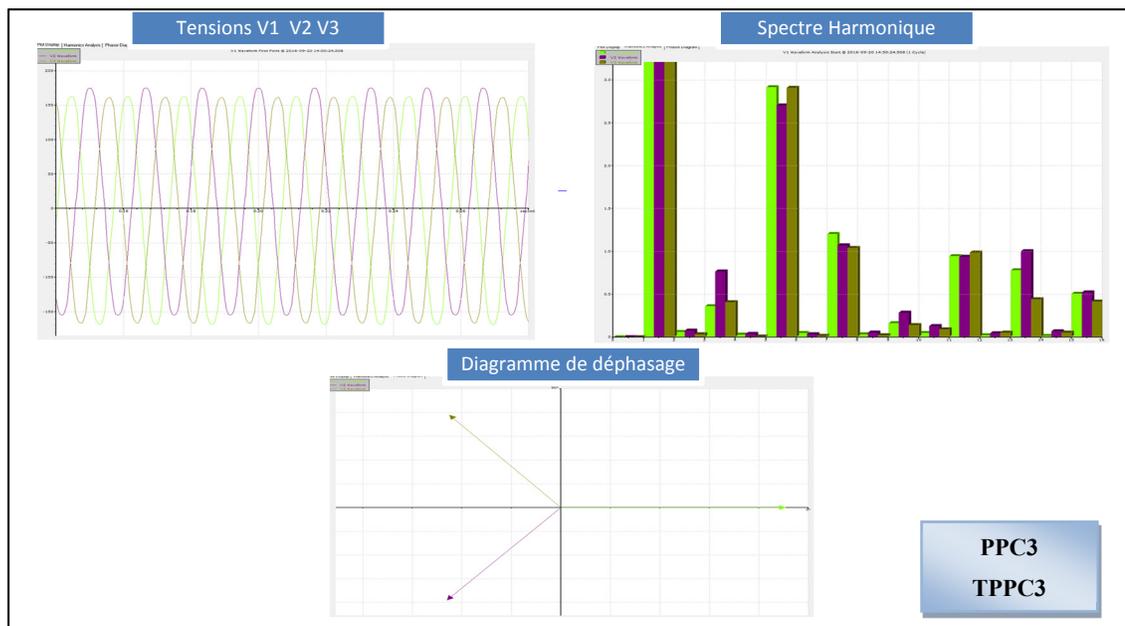


Figure 3.93 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPC3 connecté au transfo TPPC3

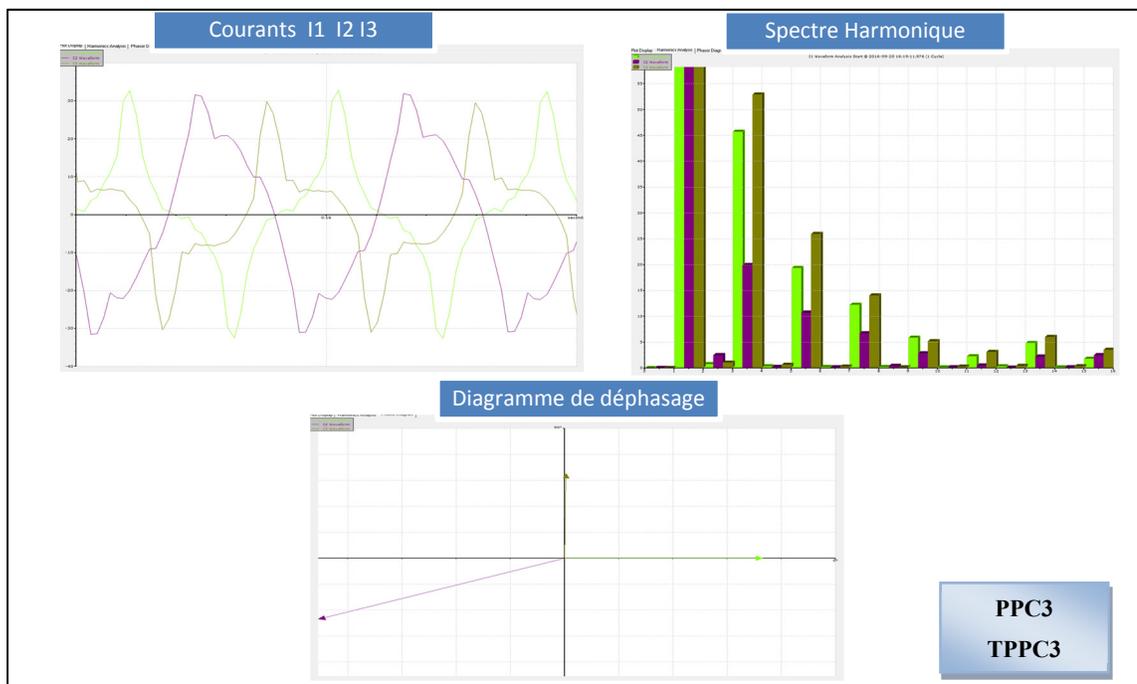


Figure 3.94 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPC3 connecté au transfo TPPC3

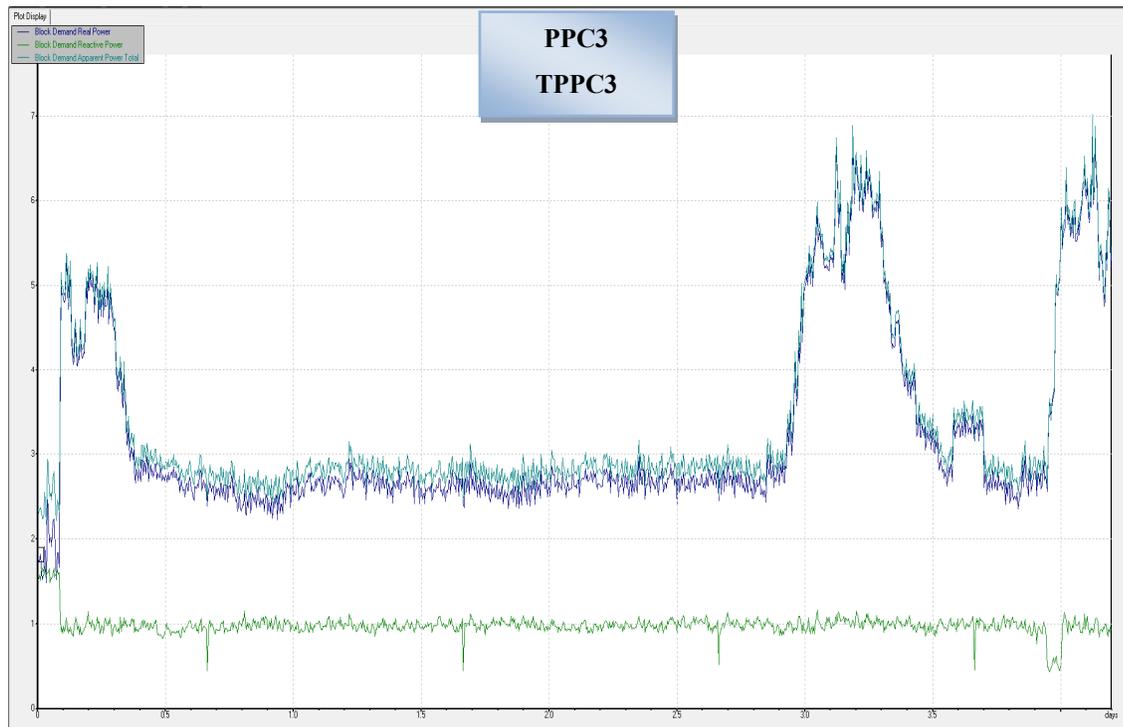


Figure 3.95 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PPC3 connecté au transfo TPPC3

Après avoir mesuré la charge du transformateur TPPC3, nous avons mesuré celle du transformateur TPPA3 installé dans la salle A-3886. Ce transformateur alimente le panneau PPA3 qui de son côté alimente les panneaux P3, B3, C3 et G3.

Ces panneaux alimentent de leur côté l'atelier informatique A-3190, le réfrigérateur installé dans le couloir de la salle A-2301, l'imprimante dans la salle A-3886, la sècheuse, le copieur, la salle de conférence A-3218, le projecteur et le frigo dans de la salle A-3326. Ils alimentent aussi le projecteur et la micro-onde dans la salle A-3324, le comptoir et la cuisinette dans A-3000, les prises des locaux A-3406, A-3358, A-3336, A-3340 et A-3342 ainsi que les couloirs près des salles A-3342 et A-3358.

En plus de ces quatre panneaux, le panneau PPA3 fournit de l'énergie pour assurer la déconnexion de la thermopompe installée dans la salle mécanique A-3880.

Le transformateur TPPA3 ainsi que le panneau PPA3 qu'il alimente sont représentés par la figure 3.96 comme suit :

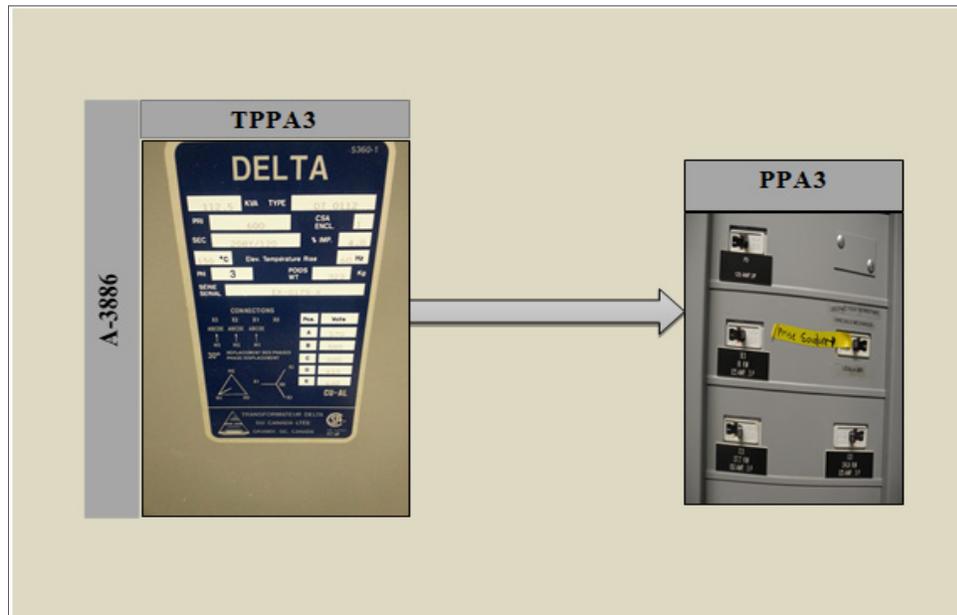


Figure 3.96 Charge alimentée par le transformateur TPPA3

Après avoir mesuré la charge totale du panneau PPA3 alimenté par le transformateur TPPA3, nous présentons ci-dessous les résultats obtenus.

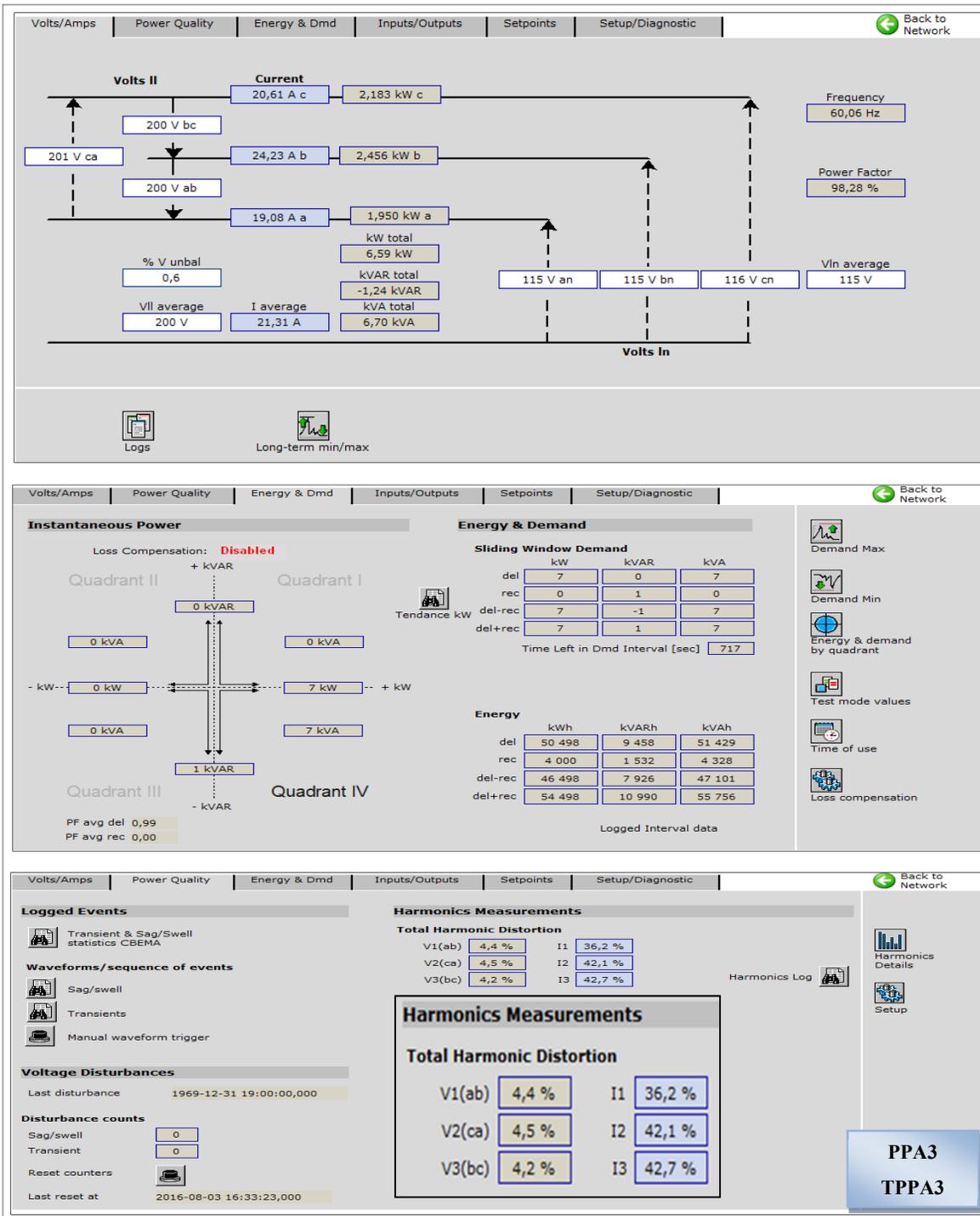


Figure 3.97 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau PPA3 connecté au TPPA3



Figure 3.98 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PPA3 connecté au transfo TPPA3

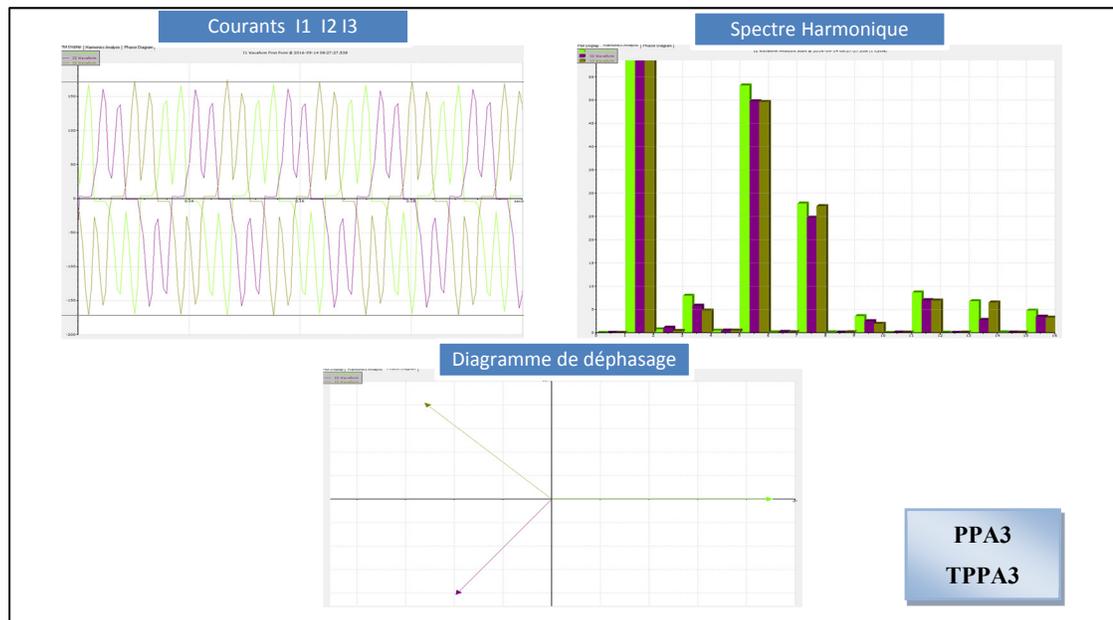


Figure 3.99 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PPA3 connecté au transfo TPPA3

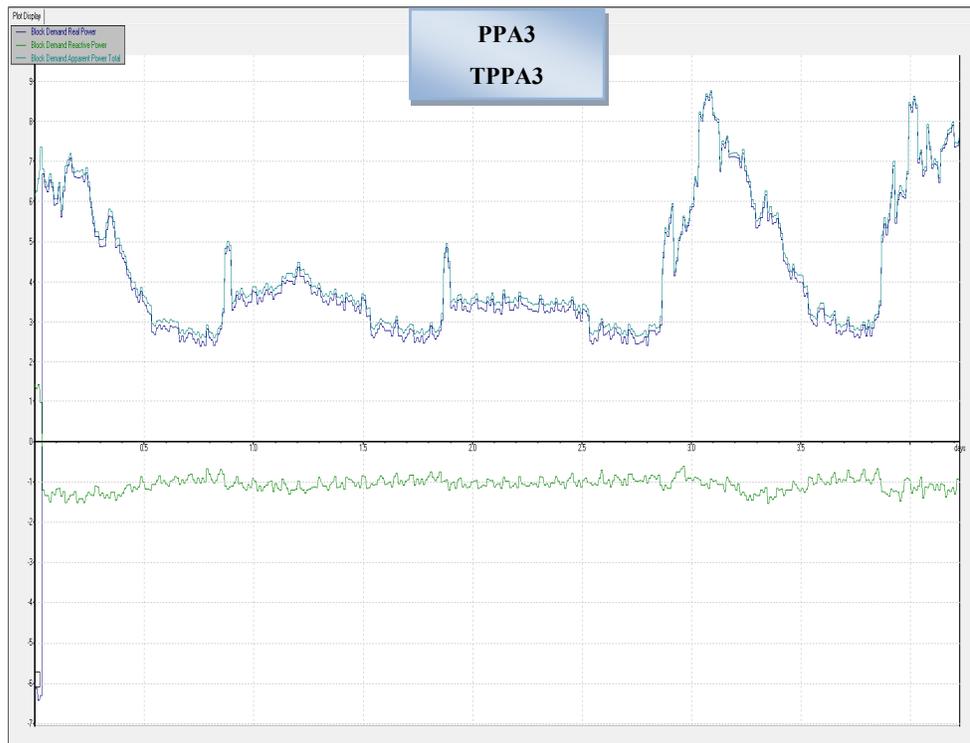


Figure 3.100 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PPA3 connecté au transfo TPPA3

Ainsi nous avons fini avec les mesures en temps réel des charges alimentées par tous les transformateurs ayant une puissance apparente supérieure ou égale à 100kVA et installés dans le pavillon principal A et tes qu'ils sont alimentés simultanément par les deux transformateurs principaux de type 25kV/600V, T1 et T2.

Nous passons maintenant aux transformateurs qui alimentent les serveurs nommés les CLUMEQ. Ces transformateurs sont à la base alimentés par le transformateur T6 de type 25kV/600V mais sont aussi installés dans le pavillon A et plus précisément au 4^{ème} étage.

3.1.2 Mesure en temps réel de la charge totale des CLUMEQ installés dans le pavillon A

Au 4^{ème} étage du pavillon A, des CLUMEQ sont installés ; il s'agit d'un ensemble de serveurs qui sont alimentés par des transformateurs de grande puissance dont les puissances apparentes nominales sont égales à 225kVA.

Ces CLUMEQ consomment beaucoup d'énergie ce qui nous a intrigués à connaître la consommation en puissance en temps réel de cet ensemble de serveurs. En, plus du profil de puissance, il est intéressant de voir les formes d'ondes des courants et des tensions ainsi que leurs taux de distorsion harmonique THD.

Donc, comme c'était le cas pour les transformateurs installés dans le pavillon A, nous nous sommes servis des analyseurs pour mesurer la charge totale en temps réel de ces CLUMEQ et visualiser les formes d'ondes des courants et des tensions et leurs THD. Tous les analyseurs connectés à ces transformateurs ont été branchés pendant au moins trois jours pour pouvoir avoir le plus de précision possible mais aussi pour couvrir plus de période de consommation réelle possible des CLUMEQ.

Le tableau 3.2 regroupe la liste des transformateurs mesurés qui alimentent les CLUMEQ. Rappelons que tous ces transformateurs sont alimentés tel qu'il était mentionné dans le chapitre 2 par le transformateur T6 du type 25kV/600V. Nous pouvons voir dans ce tableau les caractéristiques figurant sur les plaques signalétiques des transfos CLUMEQ qui possèdent tous une puissance apparente nominale égale à 225kVA.

Tableau 3.2 Transformateurs de puissance apparente nominale $S \geq 100\text{kVA}$ alimentant les CLUMEQ

CLUMEQ-PAVILLON A								
Local	TRANSFO	No. de série	Modèle	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
A-4530	TRANSFO 04-08	1888	H1ET-30-600-415-225-S	3,90%	225	600	415Y/240	D/y
CLUMEQ	TRANSFO 04-07	1843	H1ET-00-600-415-225-S	3,60%	225	600	415Y/240	D/y
	TRANSFO 04-06	1887	H1ET-30-600-415-225-S	3,90%	225	600	415Y/240	D/y
	TRANSFO 04-05	1842	H1ET-00-600-415-225-S	3,60%	225	600	415Y/240	D/y
	TRANSFO 04-04	1889	H1ET-30-600-415-225-S	3,90%	225	600	415Y/240	D/y
	TRANSFO 04-03	1841	H1ET-00-600-415-225-S	3,60%	225	600	415Y/240	D/y

Nous avons commencé nos mesures par le panneau (400) alimenté par le transformateur TRANSFO 04-03 que nous pouvons voir dans le tableau 3.2.

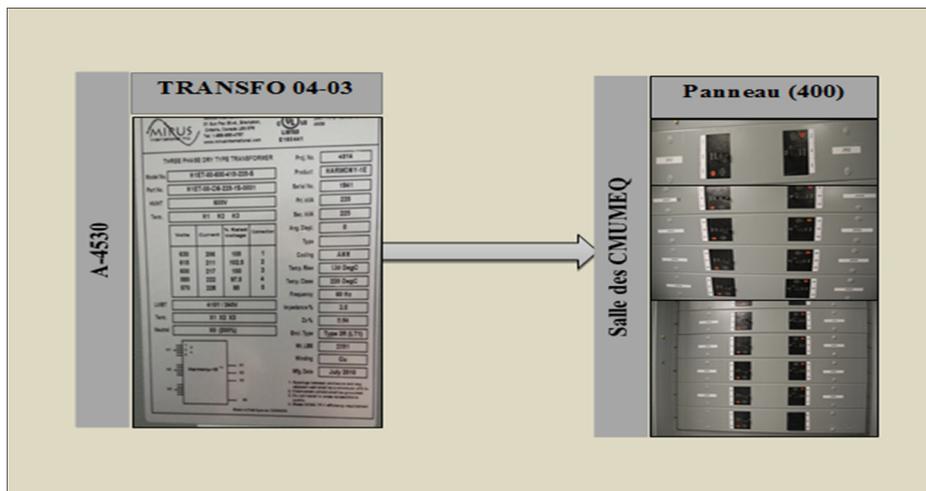


Figure 3.101 Charge alimentée par le transformateur TRANSFO 04-03

Comme le montre la figure 3.101, le panneau (400) alimente une partie des serveurs CLUMEQ ; en effet, cette partie est représentée par les unités 2R02, 2R03, 2R04, 2R05, 2R06 et 2R07. Les mesures expérimentales obtenues en temps réel de la charge du panneau (400) sont présentées par les figures 3.102, 3.103, 3.104 et 3.105.

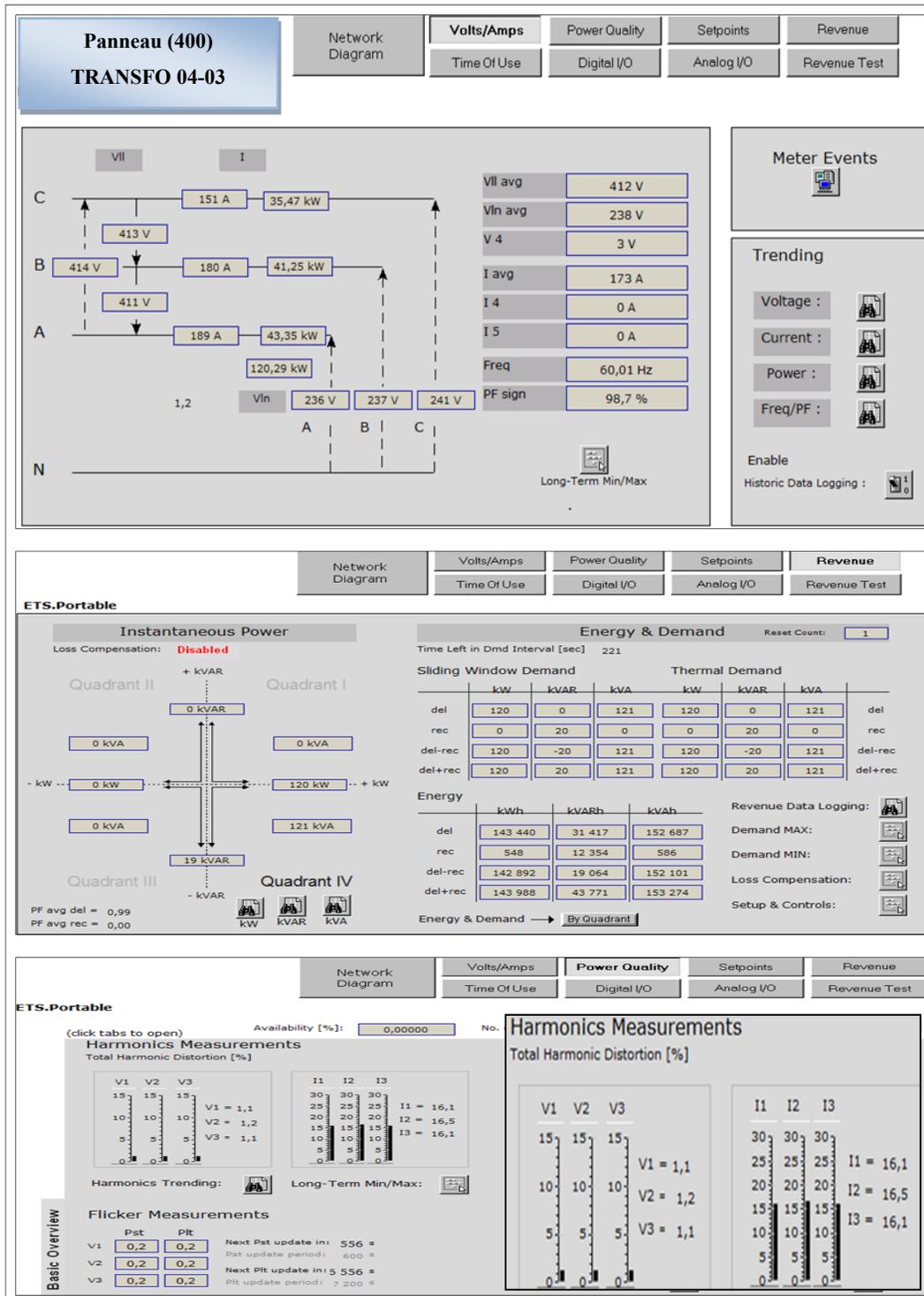


Figure 3.102 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (400)-TRANSFO 04-03

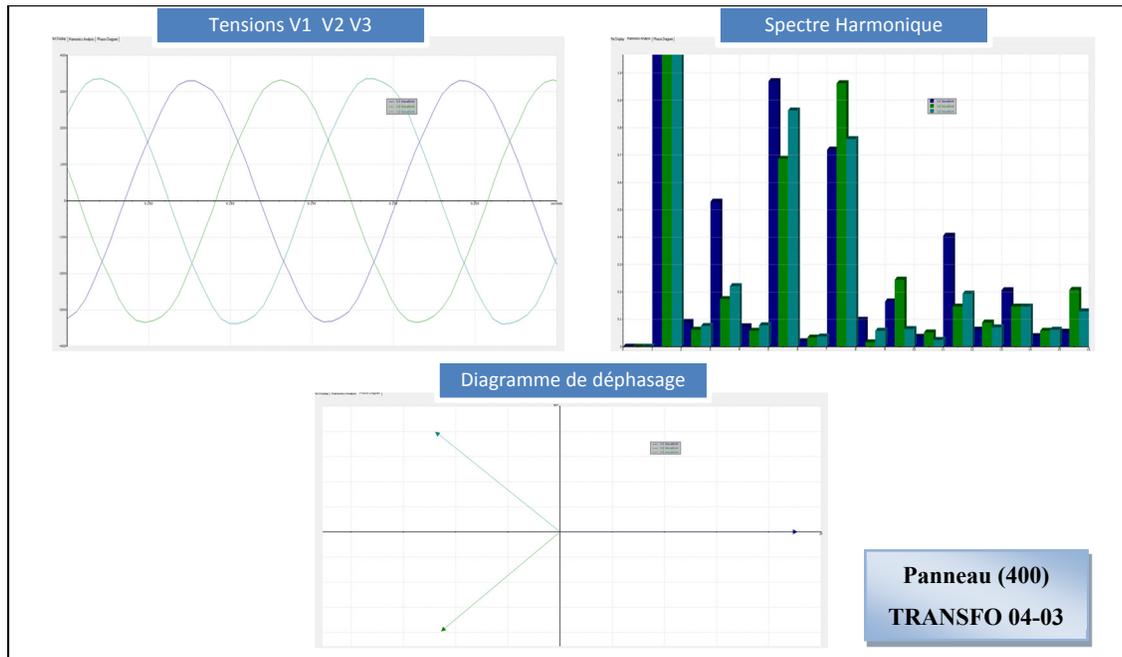


Figure 3.103 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (400)-TRANSFO 04-03

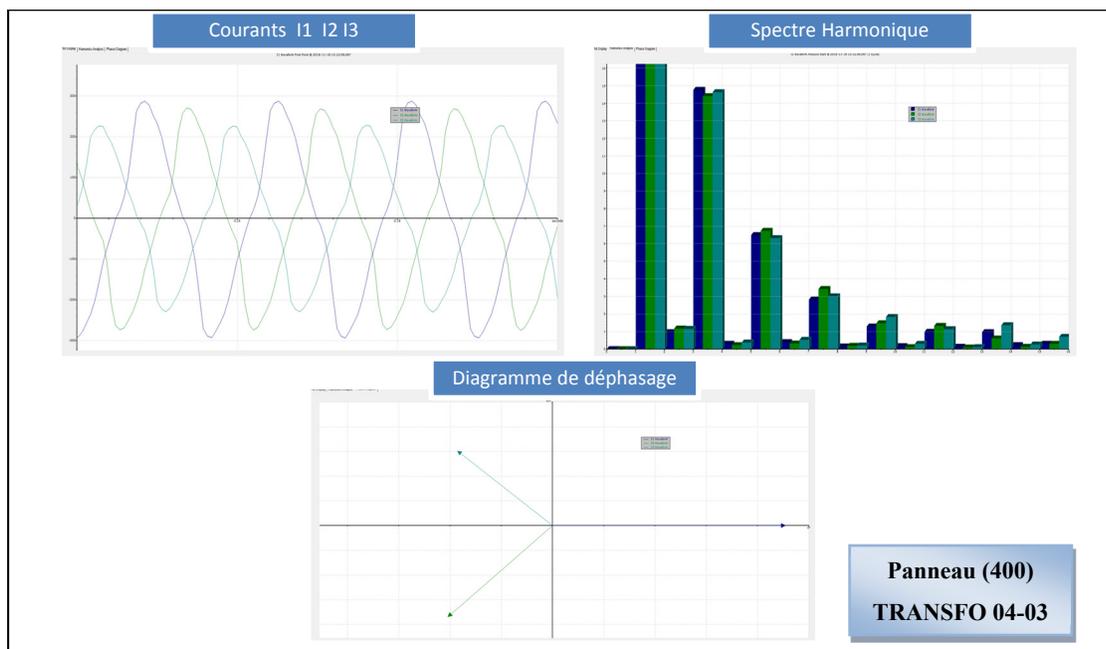


Figure 3.104 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (400)-TRANSFO 04-03

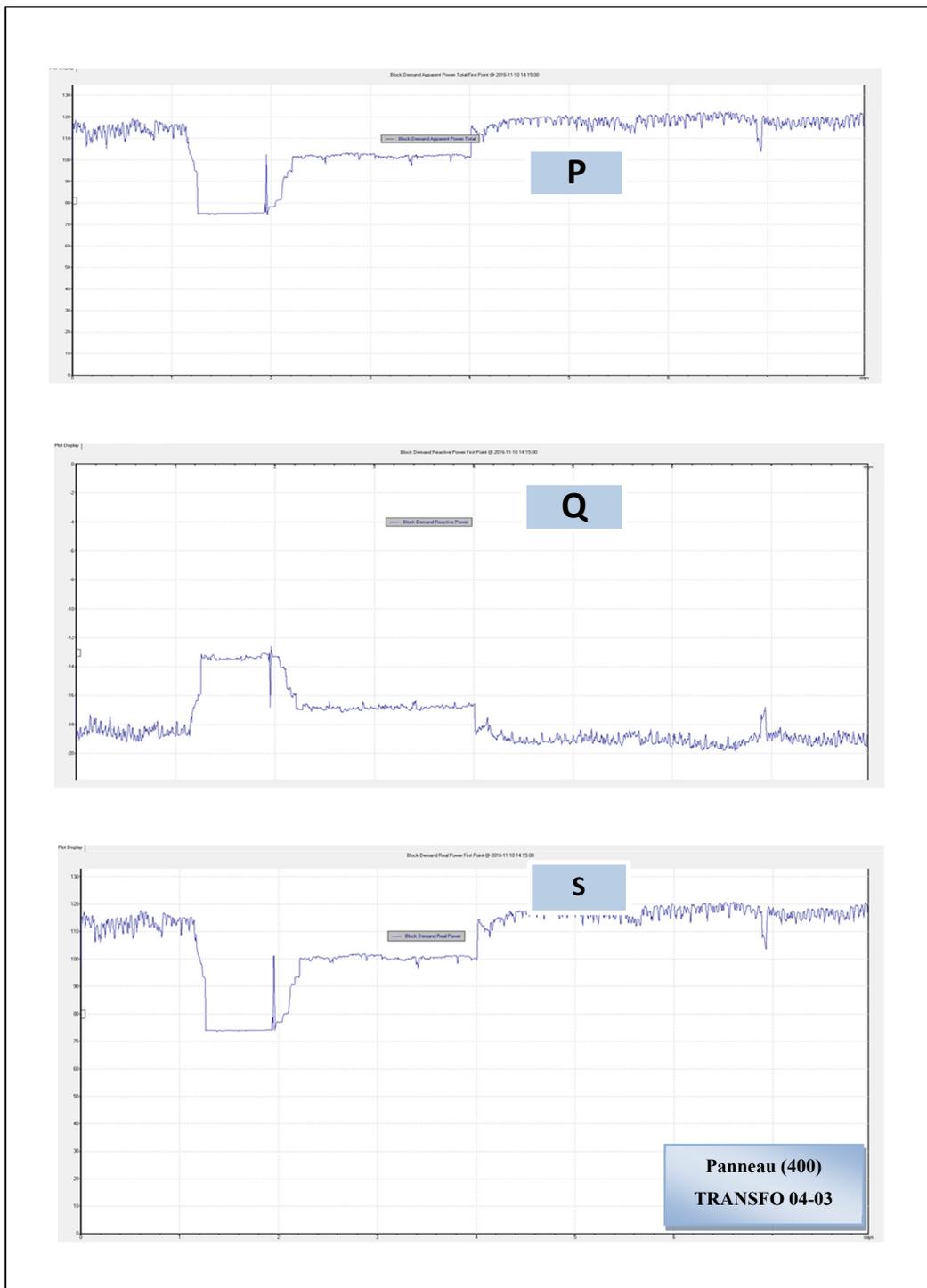


Figure 3.105 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (400) connecté au TRANSFO 04-03

Après avoir mesuré le panneau (401) alimenté par le transformateur TRANSFO 04-03, nous sommes passé au transformateur suivant ; TRANSFO 04-04 installé aussi dans la même salle A-4530. Le TRANSFO 04-04 est de puissance apparente nominale 225kVA, nous pouvons voir les autres caractéristiques de sa plaque signalétique sur le tableau 3.2. D'autre part, ce transformateur alimente un deuxième panneau installé dans la salle des CLUMEQ ; il s'agit du panneau (401) qui alimente une partie des CLUMEQ ou serveurs installés, tel qu'il était mentionné au début de ce paragraphe, au 4^{ème} étage du pavillon A.

Les serveurs alimentés par ce panneau (401) sont 2R08, 2R09, 2R10, 2R11, 2R12 et 2R13.

Le transformateur TRANSFO 04-04 ainsi que le panneau (401) sont comme suit :

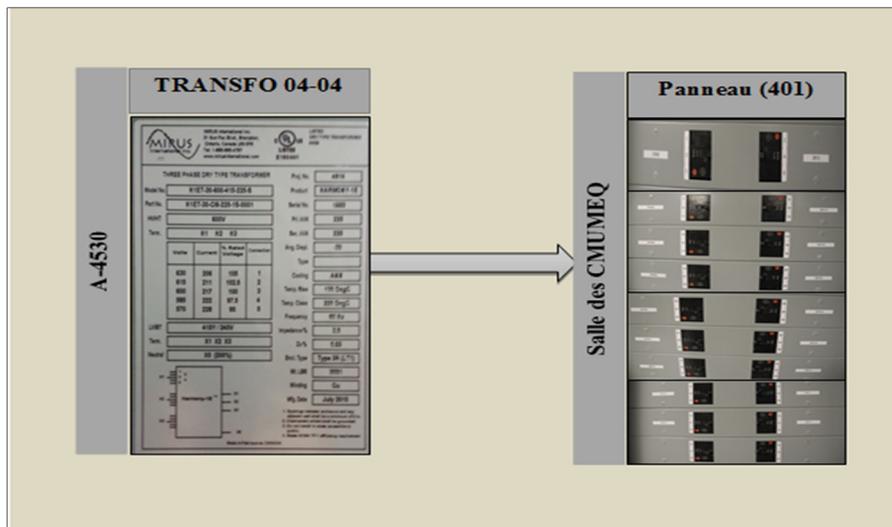


Figure 3.106 Charge alimentée par le transformateur TRANSFO 04-04

Les figures 3.107, 3.108, 3.109 et 3.110 montrent les résultats obtenus tout en mesurant la charge du panneau (401) alimenté par le TRANSFO 04-04.

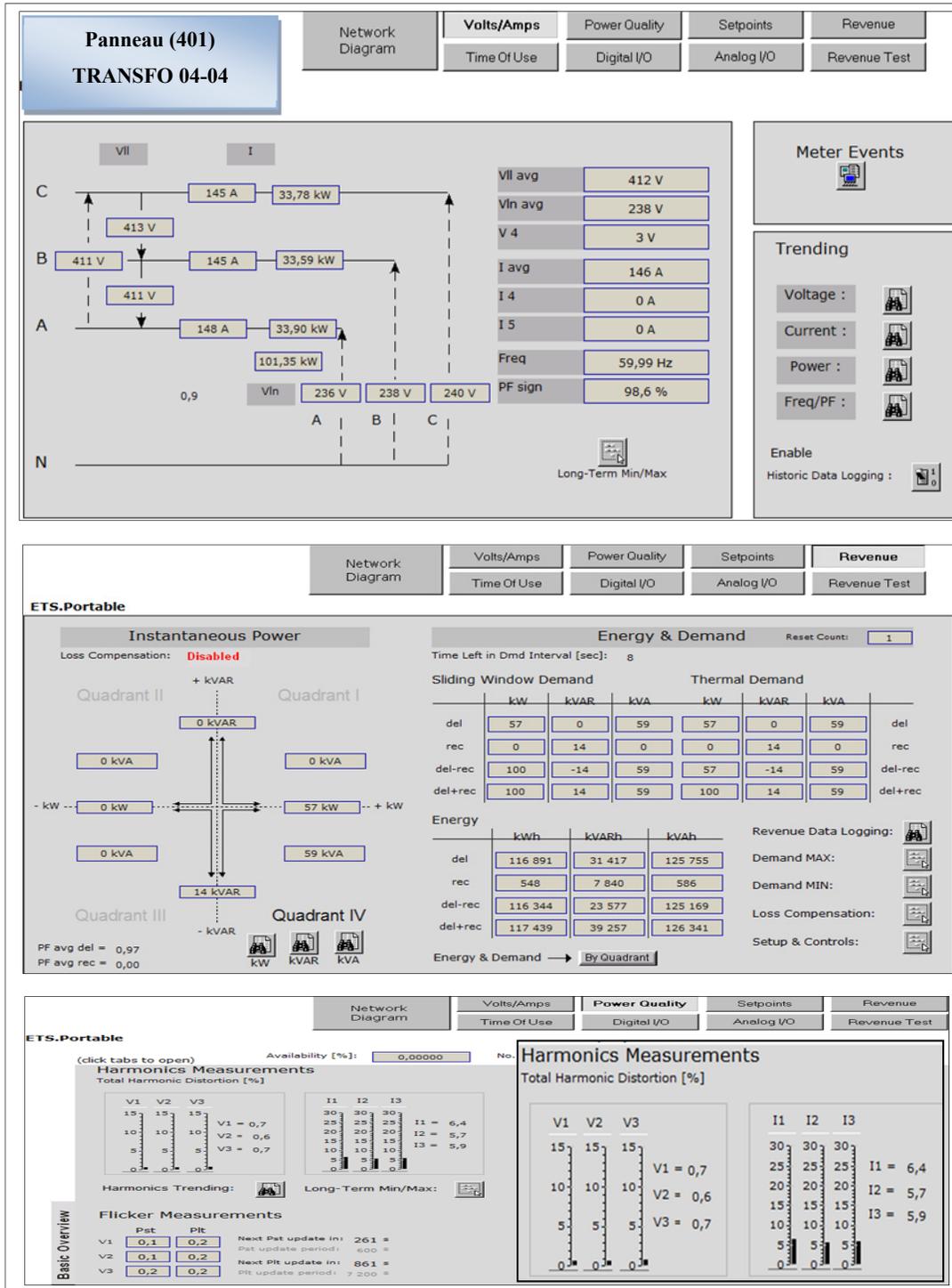


Figure 3.107 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge du panneau (401)-TRANSFO 04-04

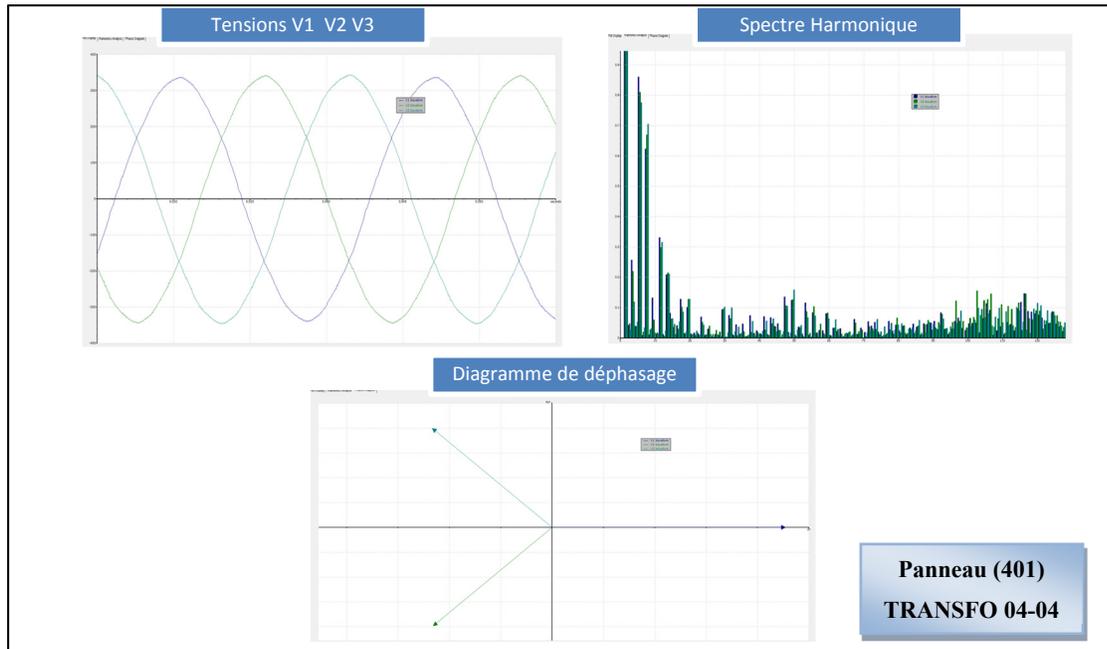


Figure 3.108 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (401)-TRANSFO 04-04

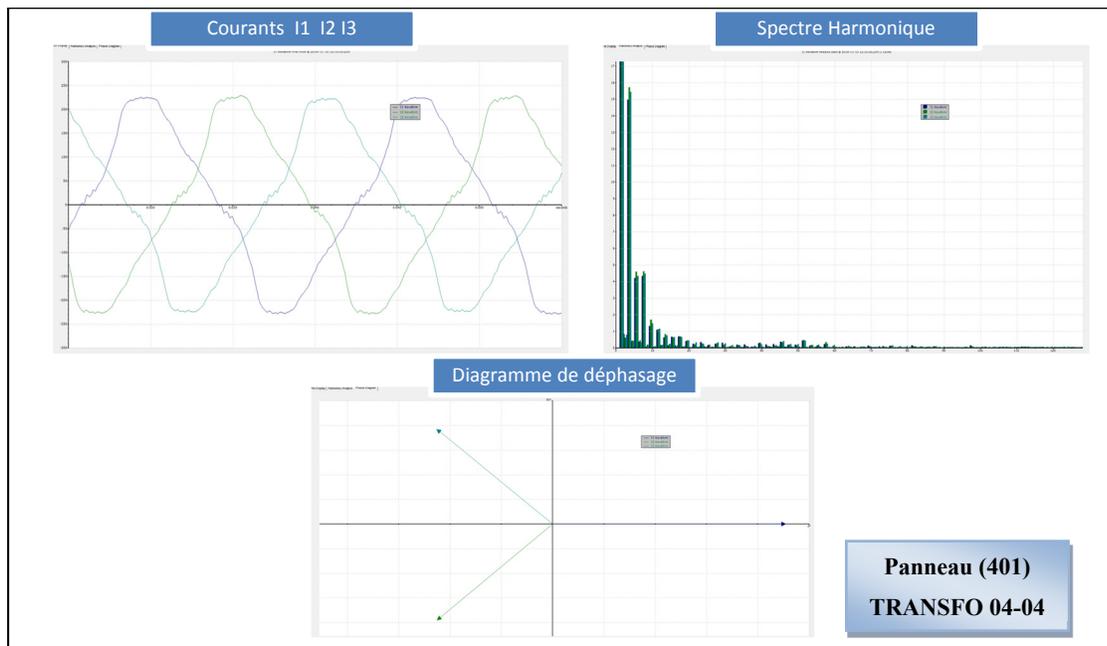


Figure 3.109 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (401)-TRANSFO 04-04

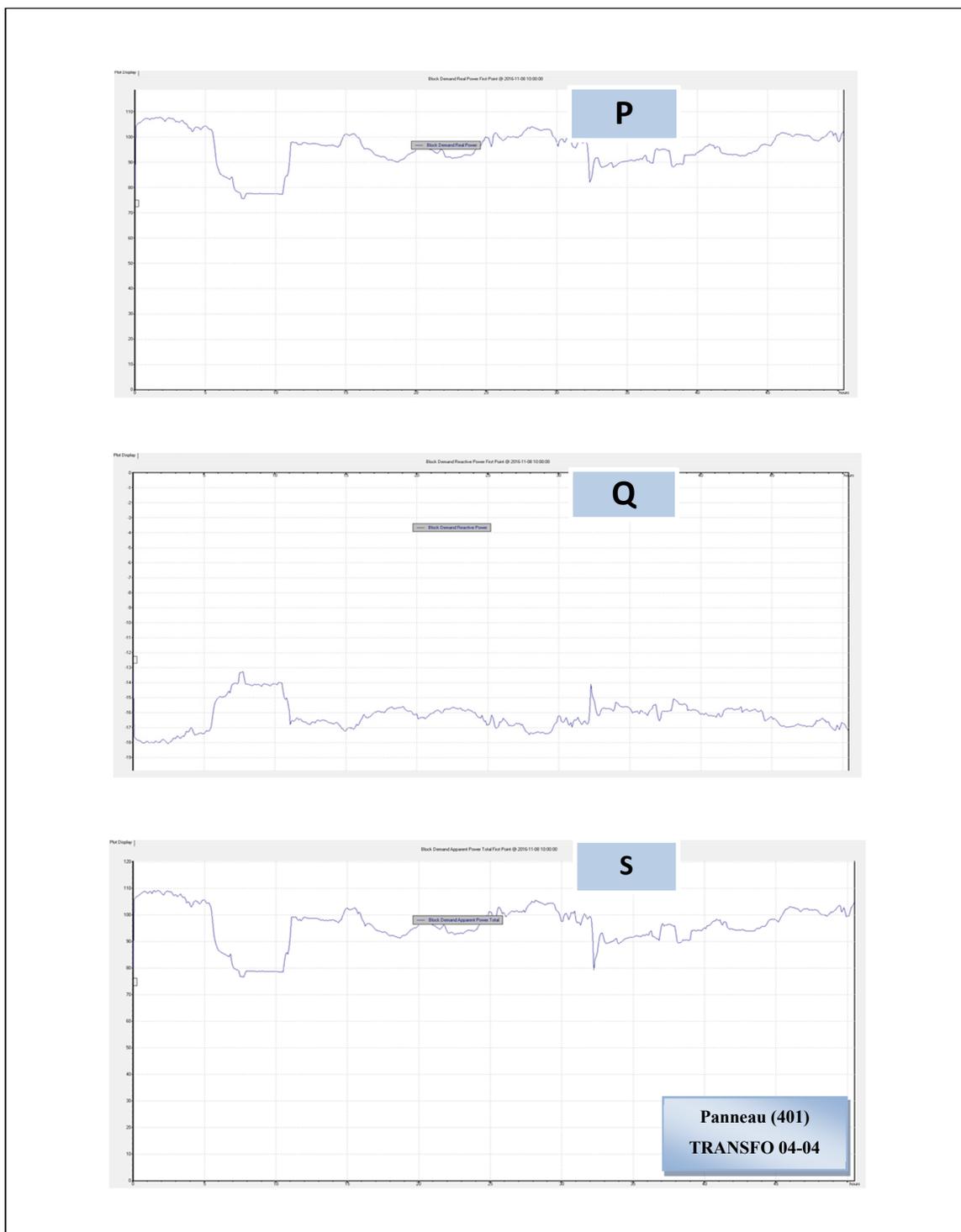


Figure 3.110 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (401) connecté au TRANSFO 04-04

La mesure de la charge du panneau (401) a été enchaînée de la mesure de celle du panneau (402).

En effet, le panneau (402) étant alimenté par le transformateur TRANSFO 04-05, alimente de son côté une autre partie des CLUMEQ. Cette partie s'agit de l'ensemble des serveurs nommés tels que 2R01, 2R14, 2R00, 2R15, 3R01, 3R03, 3R05, 3R05 CEBRAIN et 3R07. Nous pouvons voir toutes ces données sur la photo prise du panneau (402) ainsi que la photo prise du transformateur TRANSFO 04-05 sur la figure 3.111.

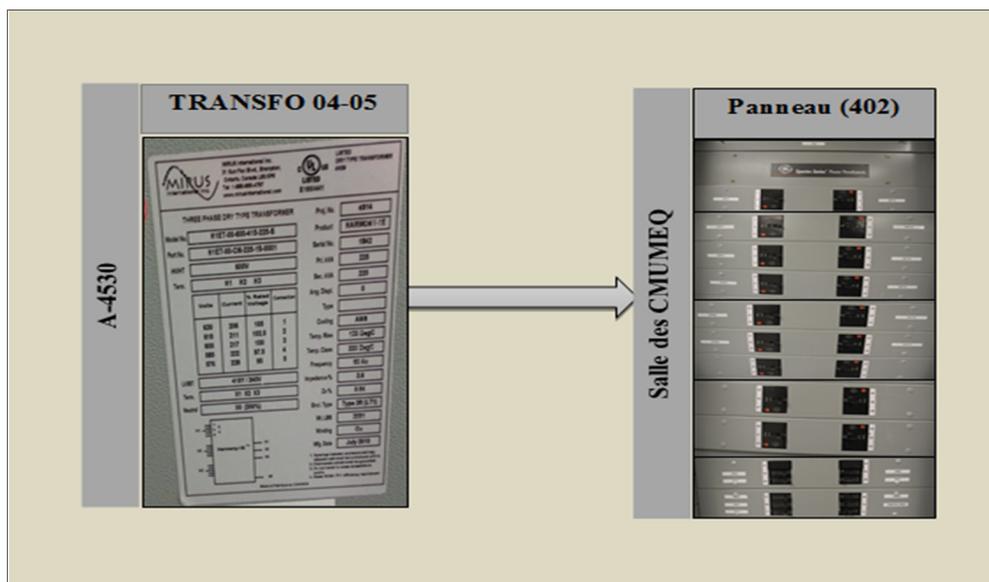


Figure 3.111 Charge alimentée par le transformateur TRANSFO 04-05

Les formes d'ondes des courants et des tensions, les valeurs de leurs THD ainsi que les puissances active, réactive, et apparente que nous avons obtenues suite aux mesures expérimentales appliquées au panneau (402) sont données ci-dessous.

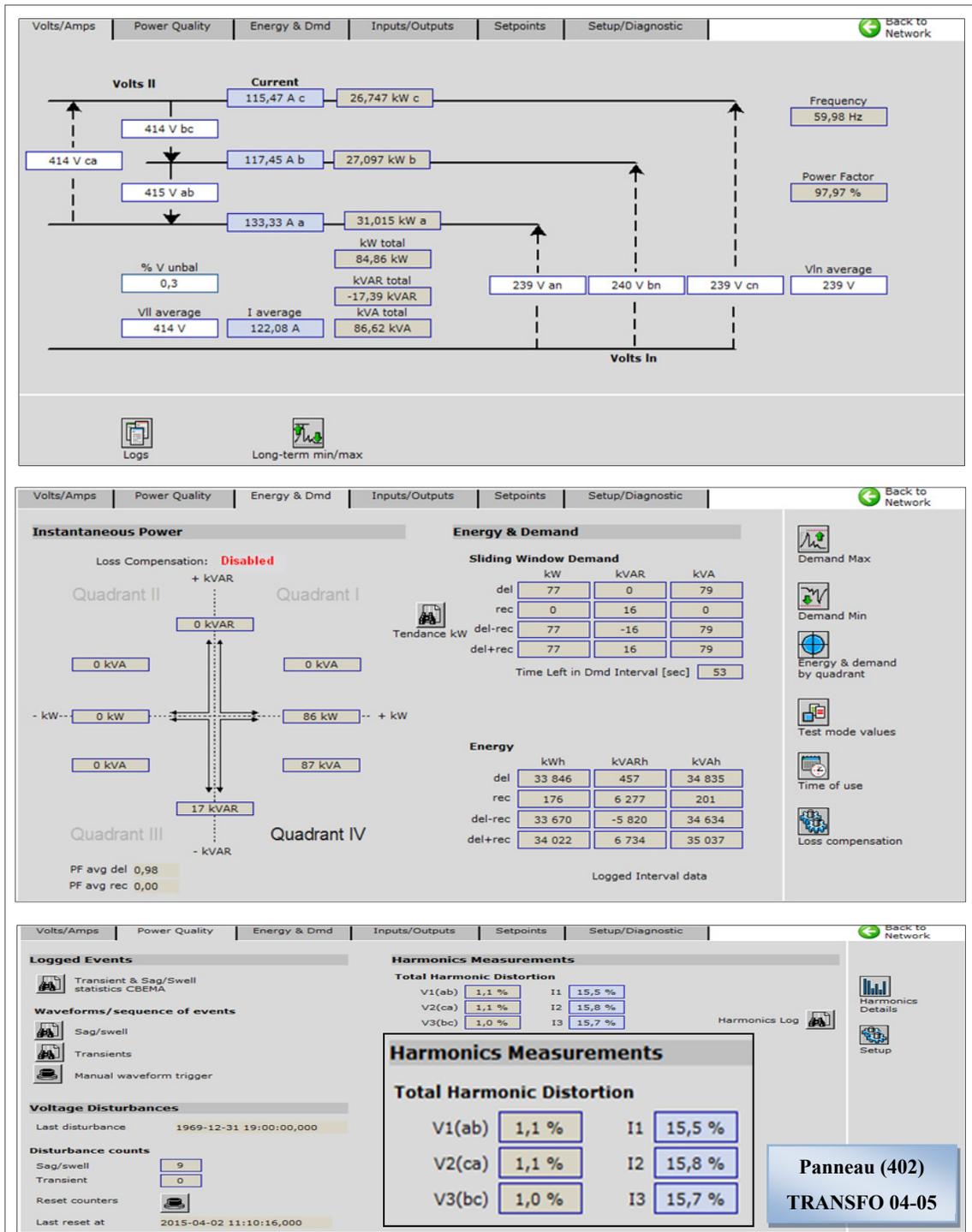


Figure 3.112 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (402) connecté au TRANSFO 04-05

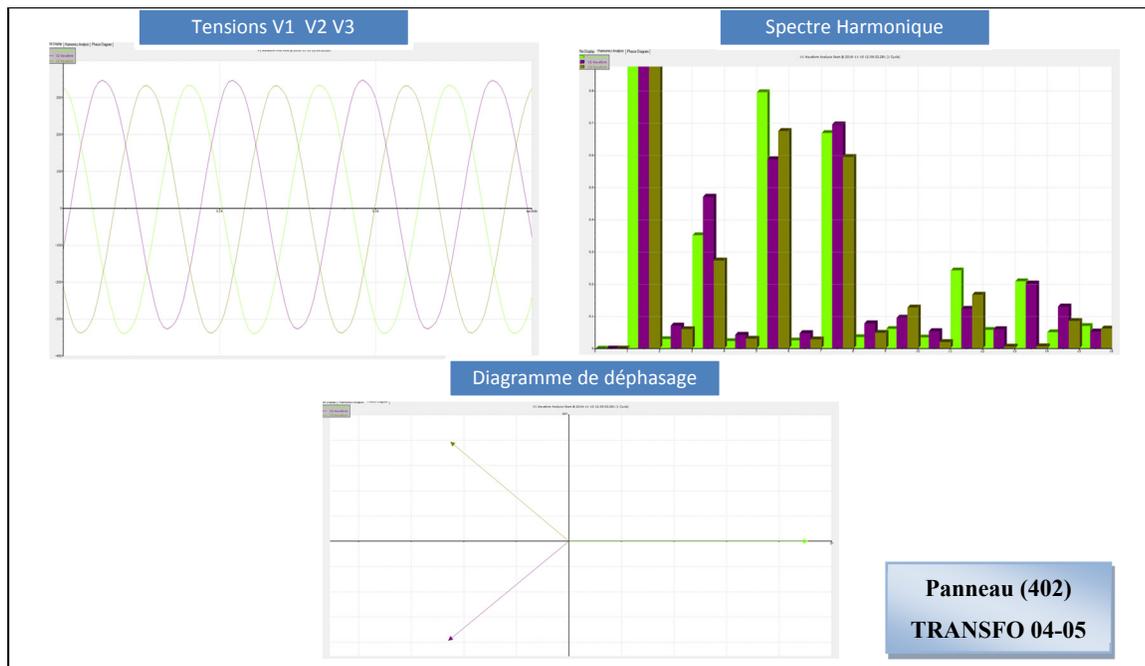


Figure 3.113 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (402)-TRANSFO 04-05

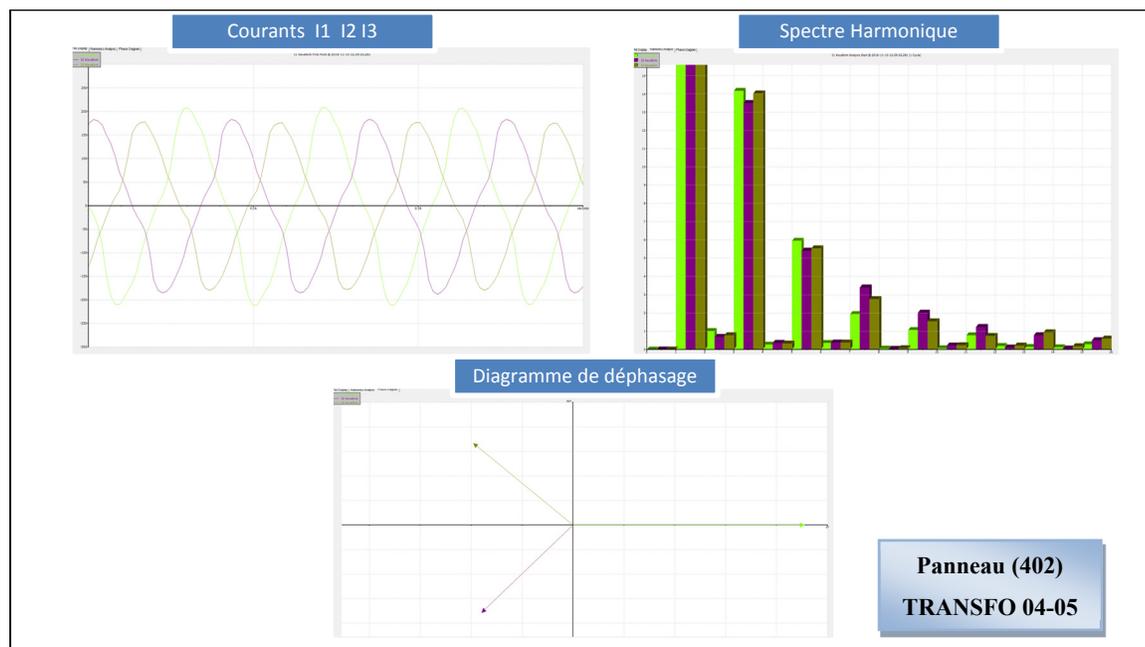


Figure 3.114 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (402)-TRANSFO 04-05

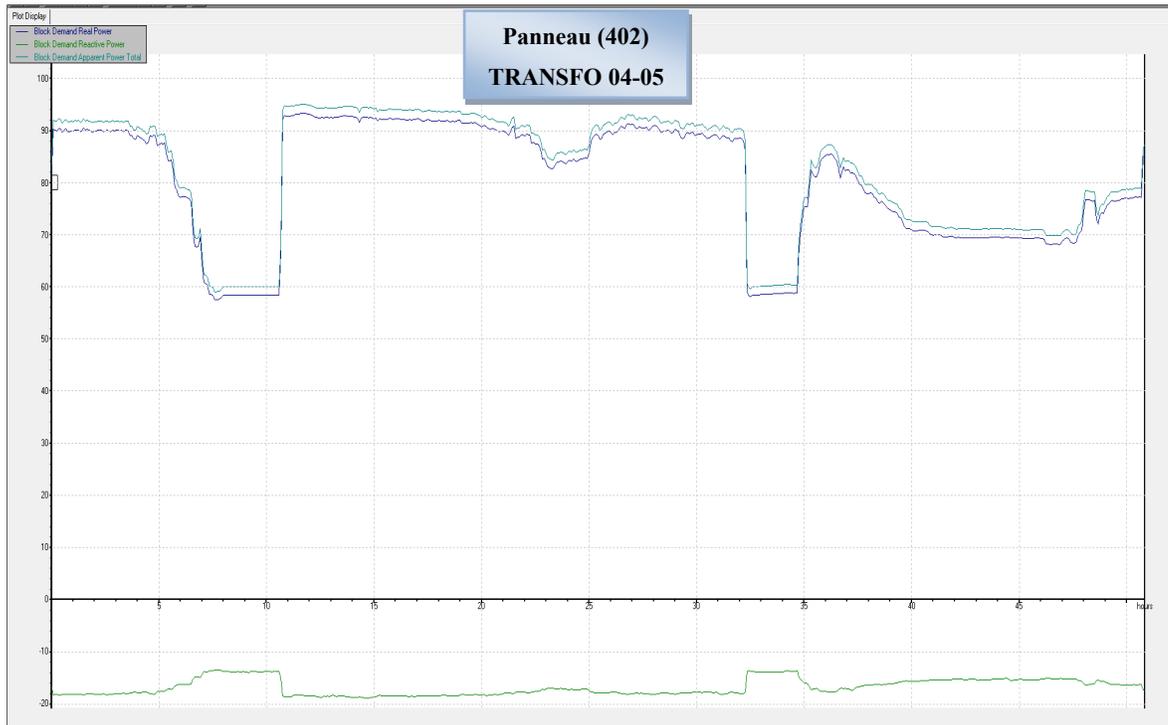


Figure 3.115 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (402) connecté au TRANSFO 04-05

En plus du panneau (402), nous étions sensés mesurer la charge du panneau (403) qui est alimenté par le transformateur TRANSFO 04-06 et qui fournit de l'énergie à une autre partie des CLUMEQ.

Cependant, le panneau (403) était en état off, ce qui nous a empêchés de mesurer la charge en temps réel de ce panneau et donc du transformateur 04-06. Par contre nous avons pris une photo du transformateur 04-06 ainsi que celle du panneau (403) qu'il alimente.

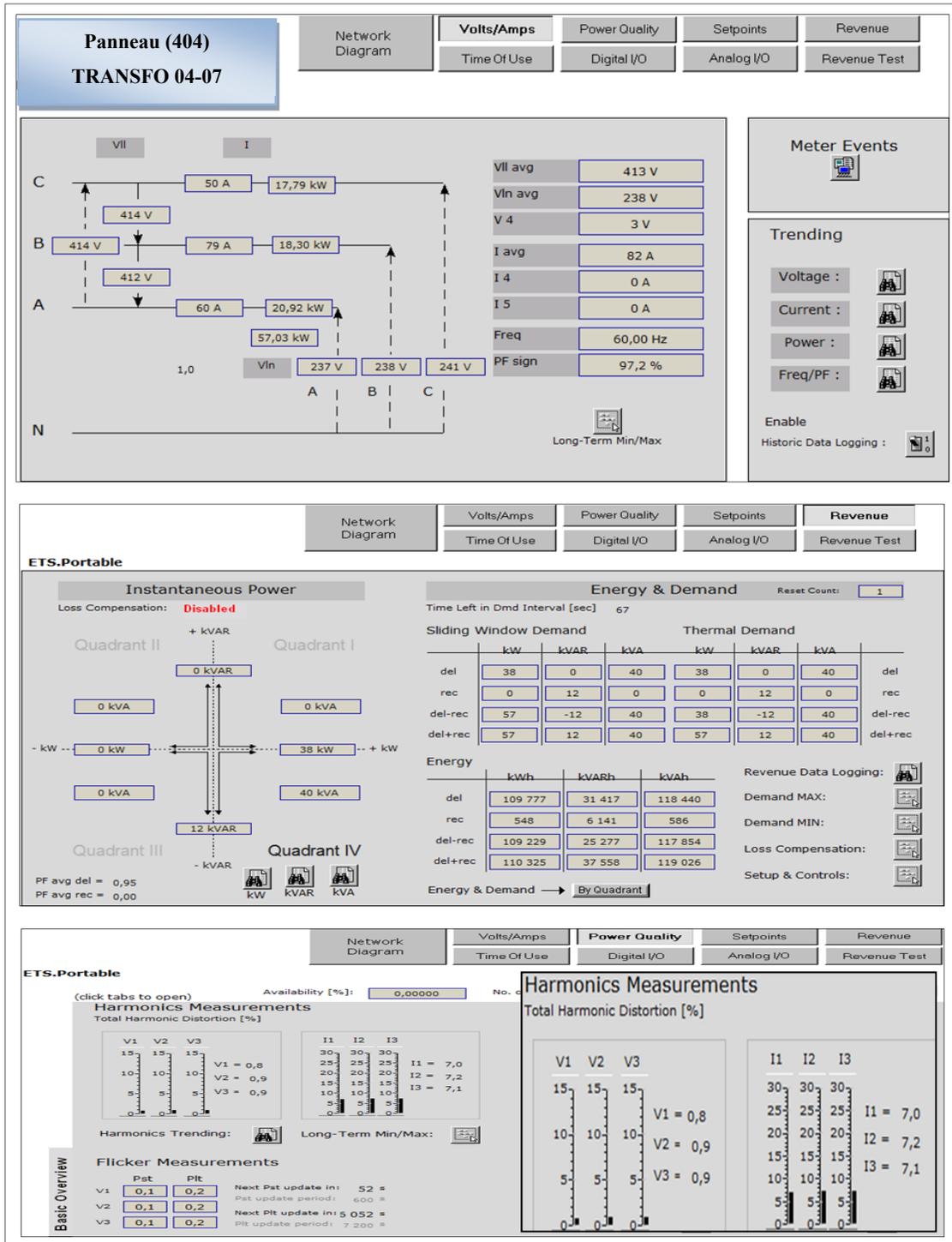


Figure 3.118 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (404)-TRANSFO 04-07

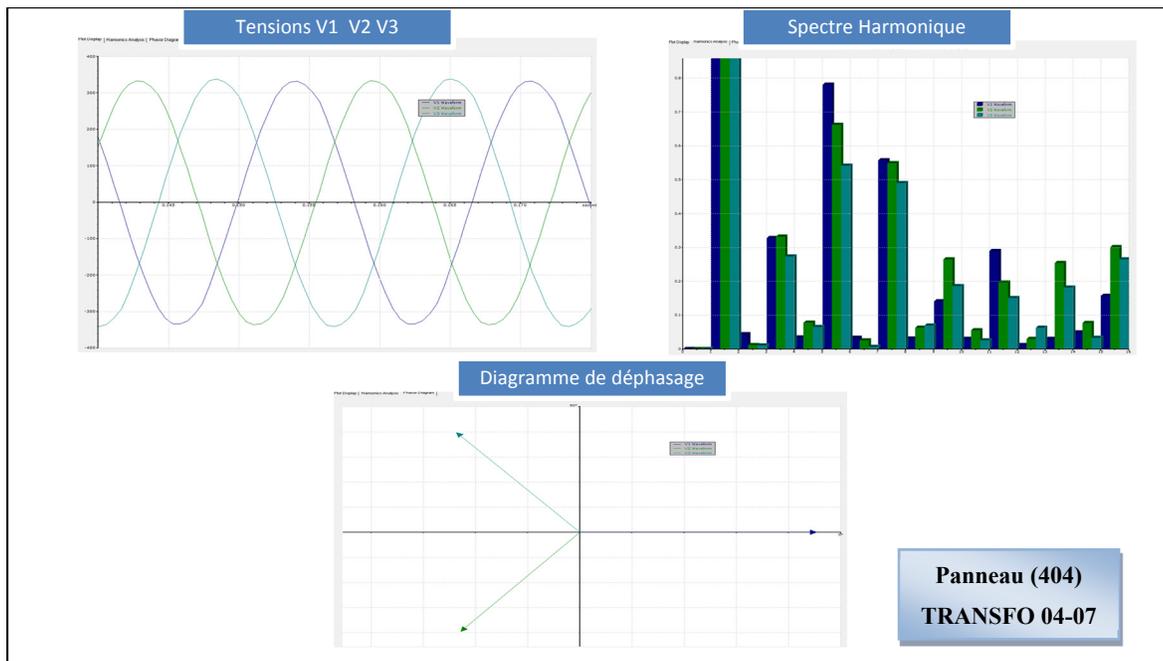


Figure 3.119 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (404)-TRANSFO 04-07

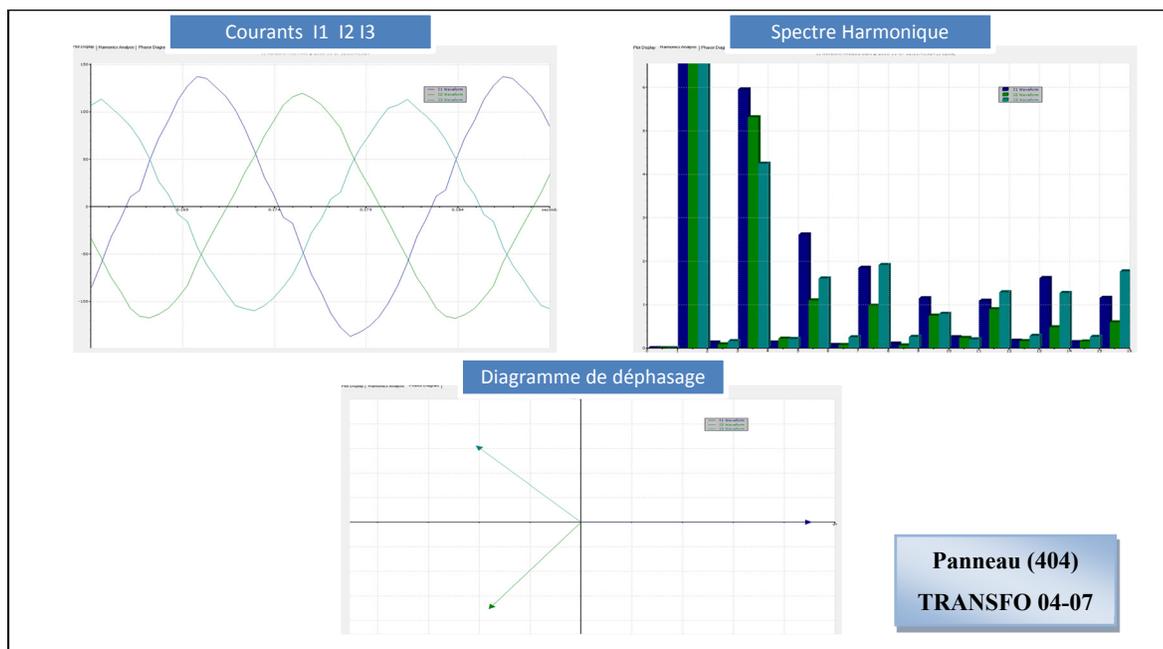


Figure 3.120 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (404)-TRANSFO 04-07

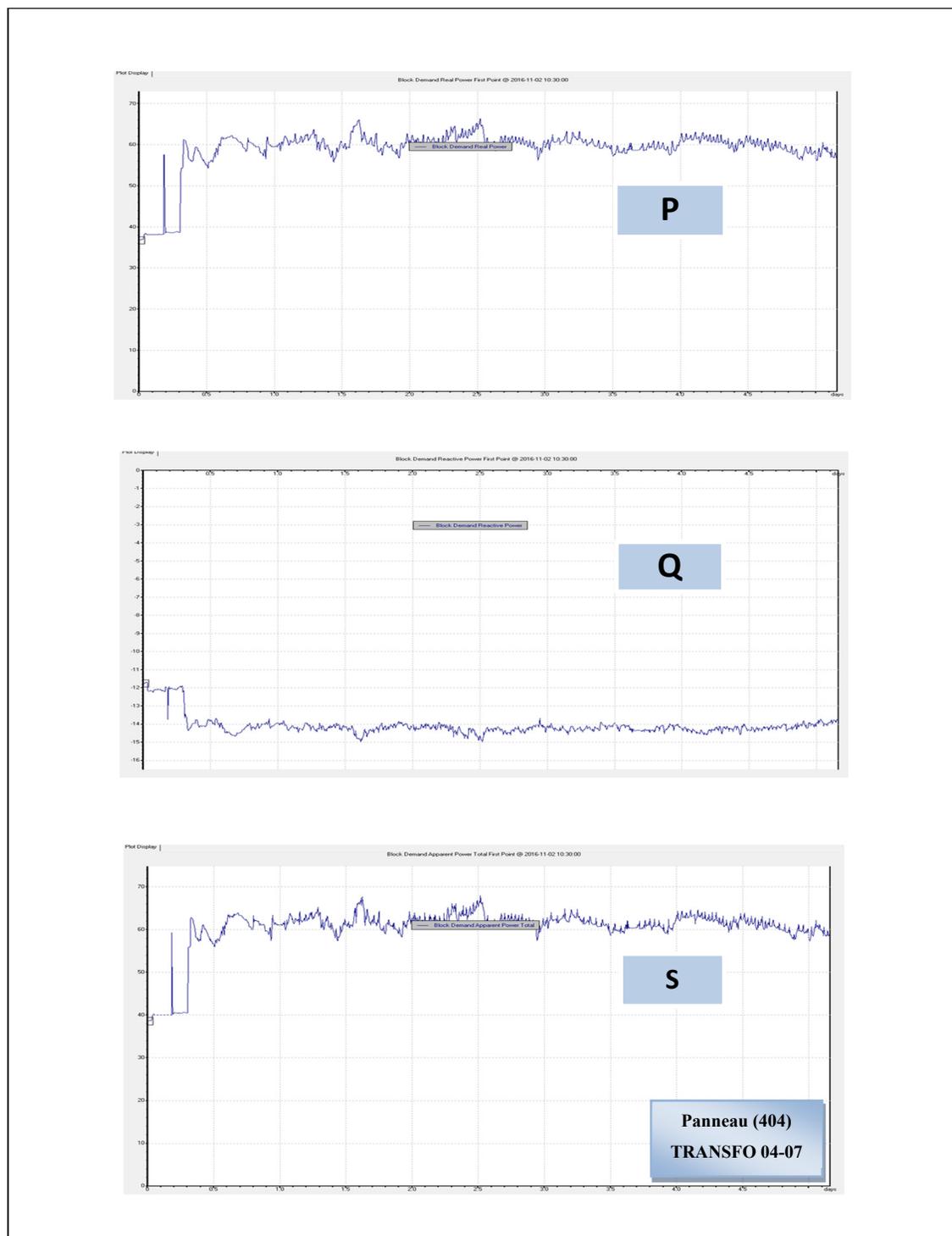


Figure 3.121 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (404) connecté au TRANSFO 04-07

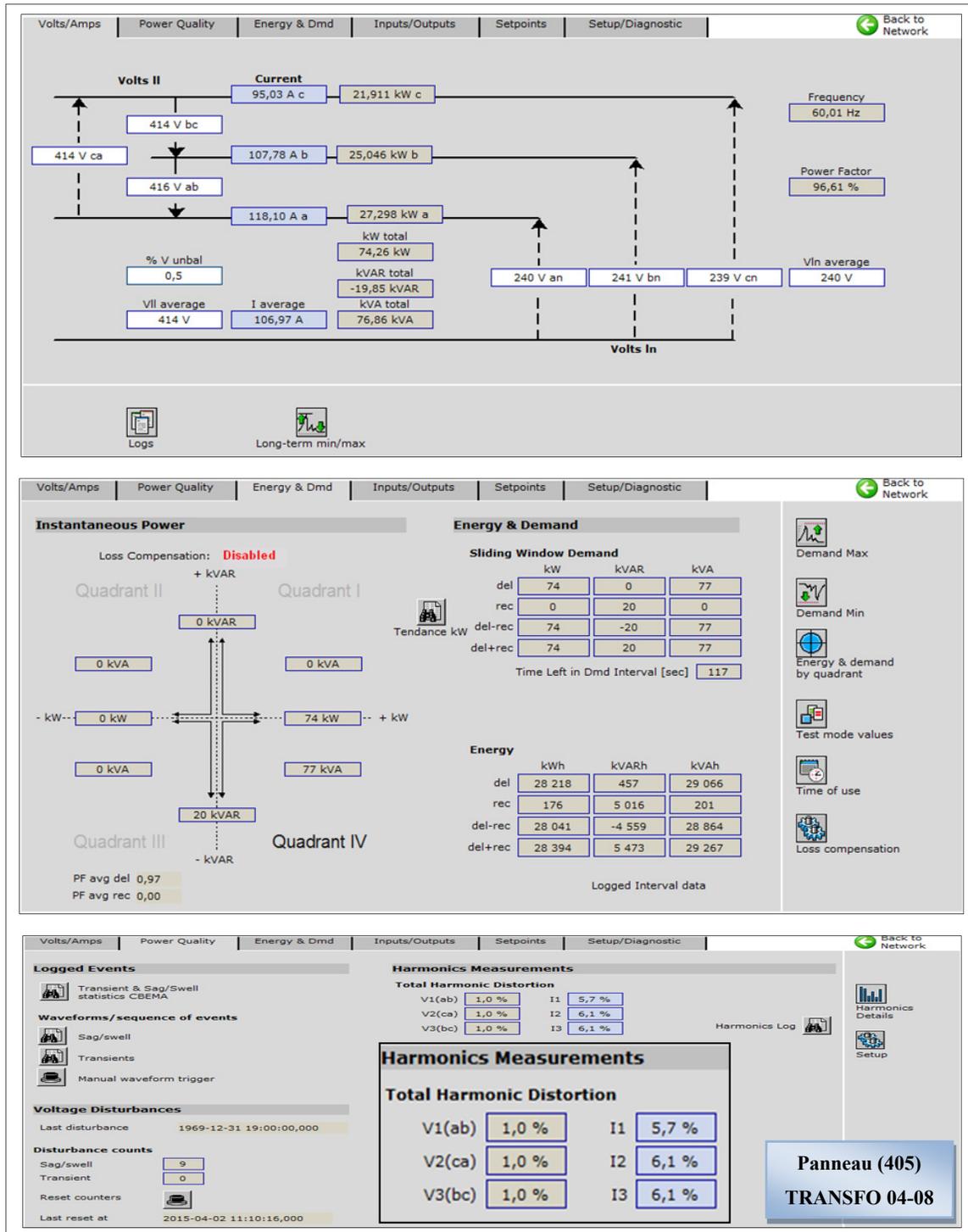


Figure 3.123 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (405)-TRANSFO 04-08

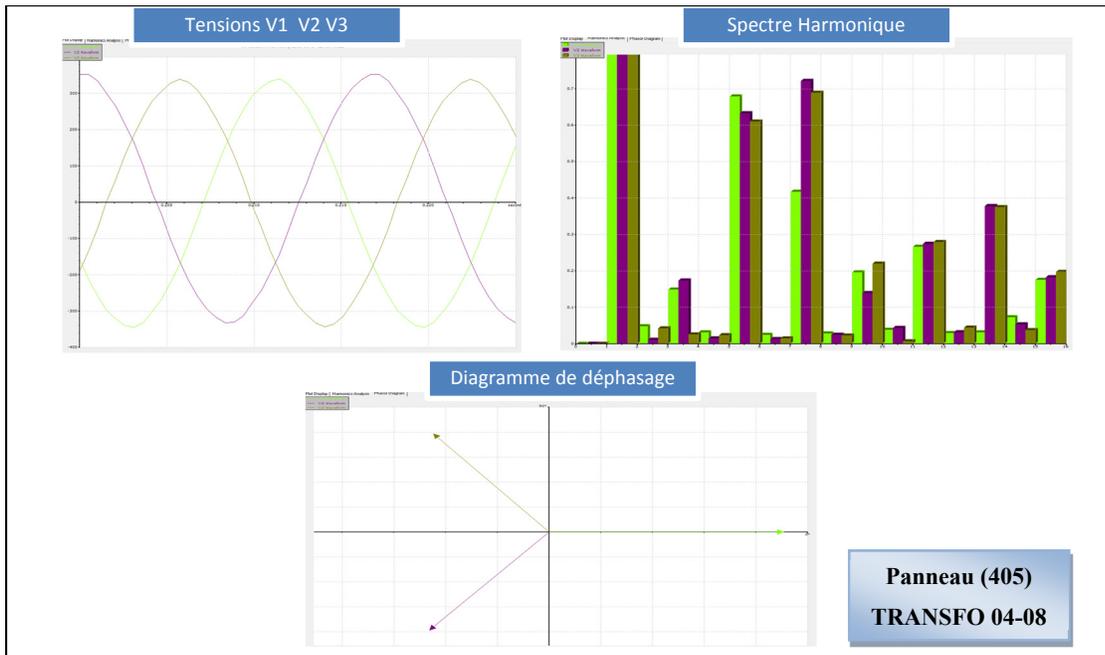


Figure 3.124 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (405)-TRANSFO 04-08

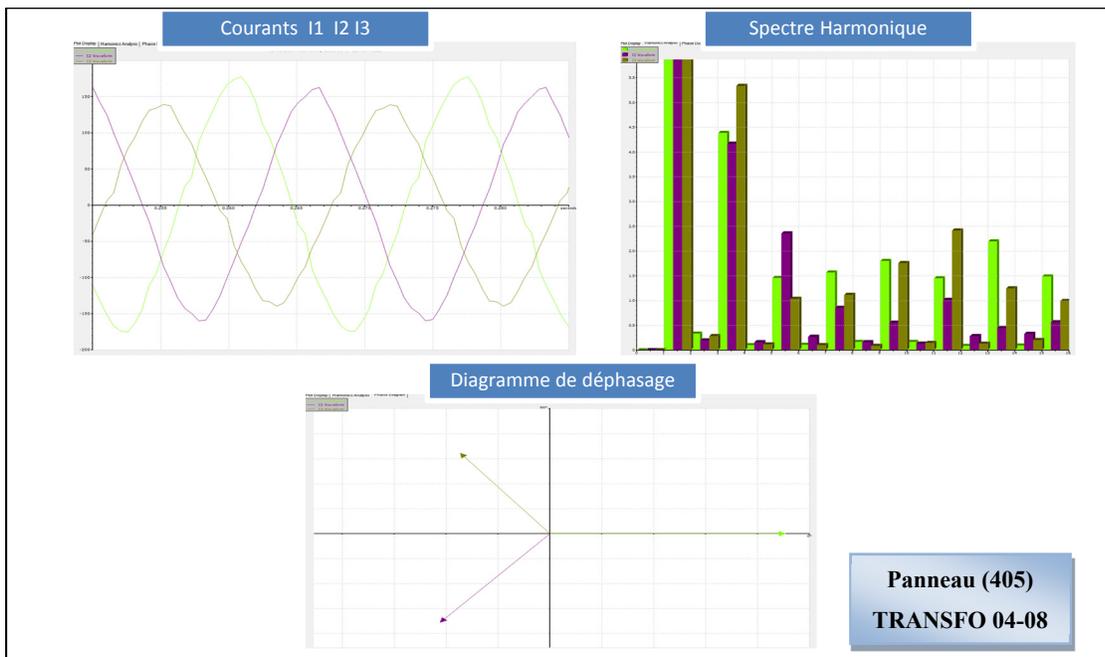


Figure 3.125 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (405)-TRANSFO 04-08

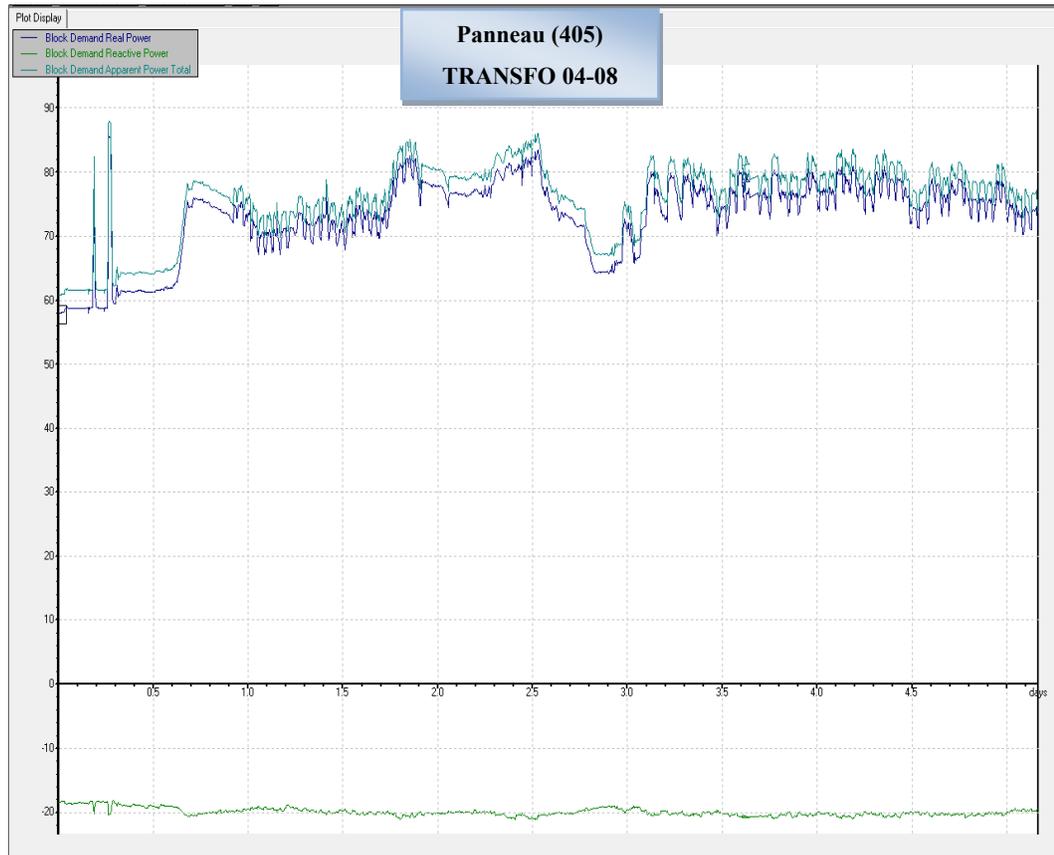


Figure 3.126 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (405) connecté au TRANSFO 04-08

Pour avoir une meilleure idée sur la charge, qu'alimentent tous ces transformateurs, nous avons élaboré un petit schéma présenté par la figure 3.127.

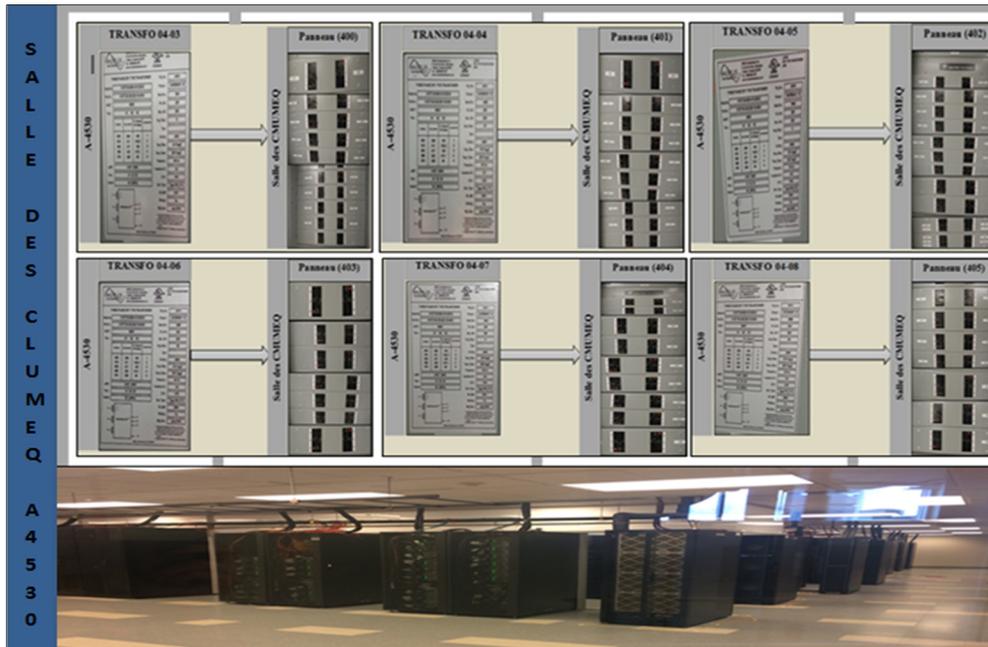


Figure 3.127 Serveurs CLUMEQ alimentés par les transfos CLUMEQ

Ainsi, pour avoir la charge totale des CLUMEQ, il suffit de sommer la charge de chaque panneau vu dans ce paragraphe et alimentant une partie de cet ensemble de serveurs. L'analyse des résultats obtenus sera présentée dans le chapitre 4, pour ce qui suit du chapitre 3, nous allons continuer les mesures des différentes charges en temps réel pour chaque bâtiment du campus universitaire.

Le paragraphe suivant de ce chapitre présentera les résultats expérimentaux obtenus suite aux mesures effectuées pour chaque charge de transformateur installé dans le pavillon B et dont la puissance apparente nominale est supérieure ou égale à 100kVA.

3.1.3 Mesure en temps réel de la charge totale du Pavillon B

Le pavillon B comporte en tout treize transformateurs dont cinq sont de puissance apparente nominale qui est supérieure ou égale à 100kVA. Ces cinq transformateurs sont listés dans le tableau 3.3 ci-dessous.

Tableau 3.3 Transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le pavillon B

PAVILLON B									
Local	TRANSFO	No. de série	No. de catalogue	Modèle	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
B-0102	RC-TR-01 TR03	DMK-0753-155213	9TCT0112VH0316310201	CDTC0112S000159	3,40%	112,5	600	208Y/120	D/y
B-1102	01-TR-01 TR05	ZML-0041-155878	VZTC0150S002869	CZTC0150S002869	3,8% / 3,4%	150	600	208/120 // 208/120	D/z
B-2102	02-TR-01 TR07	ZML-0042-155878	VZTC0150S002869	CZTC0150S002869	3,8% / 3,4%	150	600	208/120 // 208/120	D/z
B-3102	03-TR-01 TR09	DMK-0752-155213	9TCT0112VH0316310201	CDTC0112S000159	3,40%	112,5	600	208Y/120	D/y
B-4602	04-TR-02 TR12	A31003-10A-1		BC2375P575S460K4	4,60%	375	575	460	Y/y

Ce tableau montre les caractéristiques de la plaque signalétique de chaque transformateur installé dans le pavillon B dont la puissance apparente nominale est supérieure ou égale à 100kVA.

Dans la suite de ce paragraphe, des résultats de mesures de la charge totale en temps réel de chaque transformateur figurant dans le tableau 3.3 seront présentés. Pour ce faire, nous avons commencé nos mesures par le transformateur RC-TR-01 qui est installé dans la salle B-0102. La figure 3.128 permet d'avoir une idée plus claire sur la charge alimentée par ce transformateur.

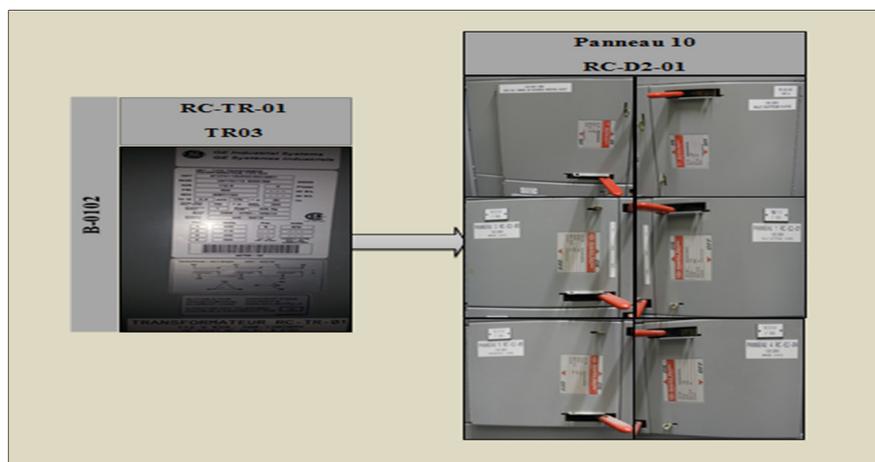


Figure 3.128 Charge alimentée par le transformateur RC-TR-01

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.128, le transformateur RC-TR-01 alimente le panneau RC-D2-01 qui alimente plusieurs charges parmi lesquelles nous pouvons mentionner les bornes de recharges pour les véhicules électriques installées au sous-sol 1.

De plus, il alimente la salle électrique dans laquelle il est installé, c'est à dire le local B-0102 et quatre panneaux électriques qui sont les panneaux (3), (4), (5) et (1). Ces quatre panneaux alimentent les locaux B-0506, B-0504, B-0107, une thermopompe dans B-0506 et les séchoirs à mains aux toilettes pour hommes du rez-de-chaussée du pavillon B. Autres charges sont aussi alimentées par ces panneaux le ventilateur de transfert VT-101 installé au CPE, la cuisine CPE qui comprend un four et un frigo, le ventilateur d'alimentation VA-103 installé au local B-0730, le ventilateur d'évacuation VE-101 localisé au B-0720 et une imprimante de type LATEX 210.

En plus de ces charges mentionnées ci-dessus, des prises en sous-tables dans les locaux B-0904, B-0906 et B-0908 et le bureau A-0700 ainsi que le comptoir et l'imprimante qui y sont installés sont alimentés pareillement par ces quatre panneaux.

Les figures 3.129, 3.130, 3.131 et 3.132 montrent les résultats expérimentaux obtenus suite aux mesures effectuées aux bornes du panneau RC-D2-01.

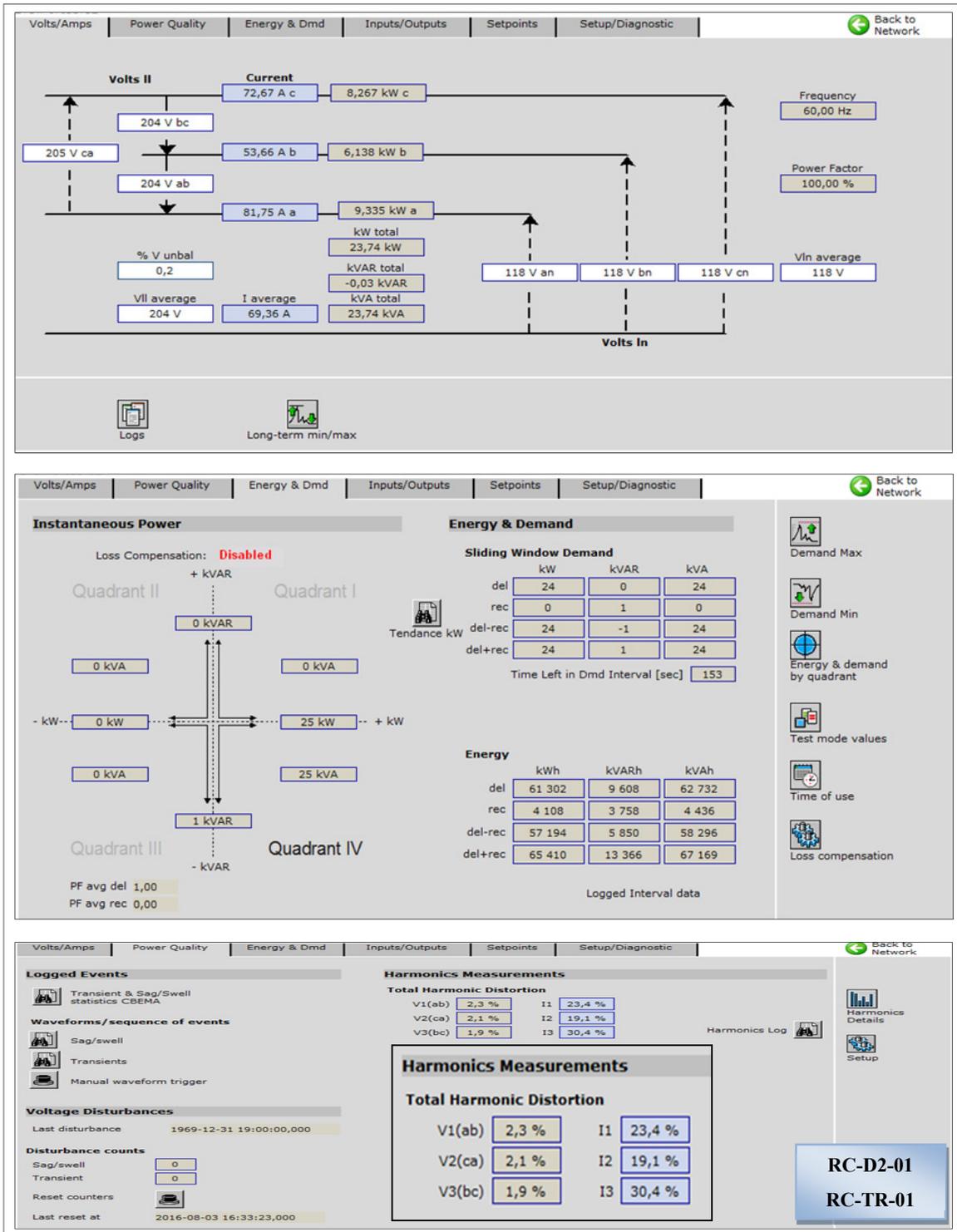


Figure 3.129 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau RC-D2-01-TRANSFO RC-TR-01

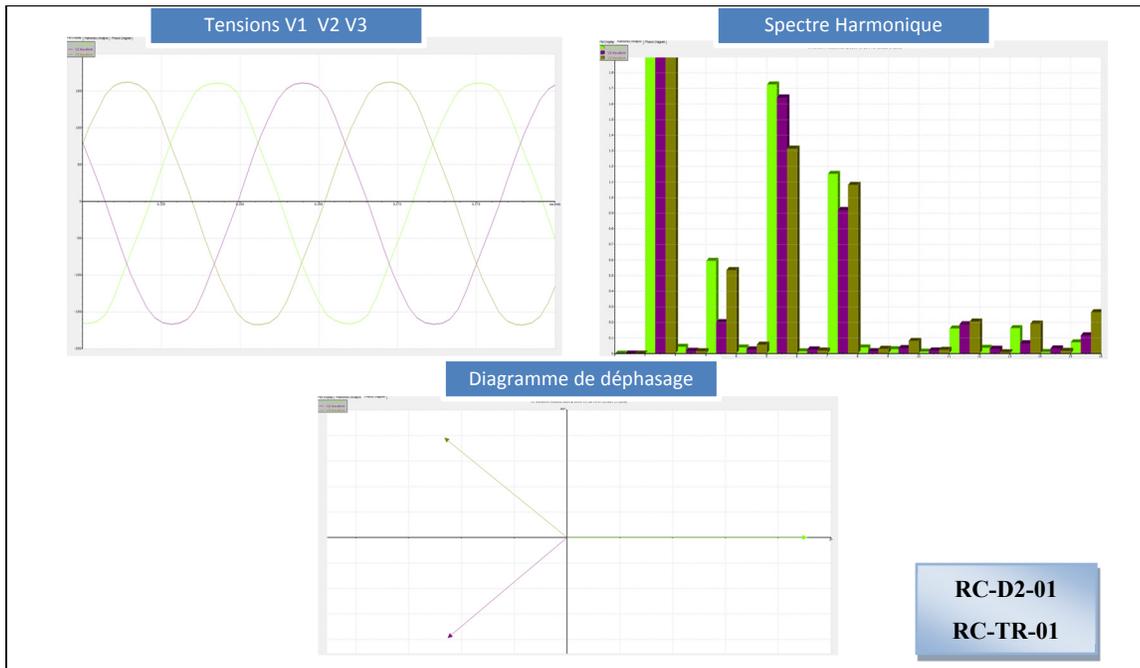


Figure 3.130 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau RC-D2-01 connecté au transformateur RC-TR-01

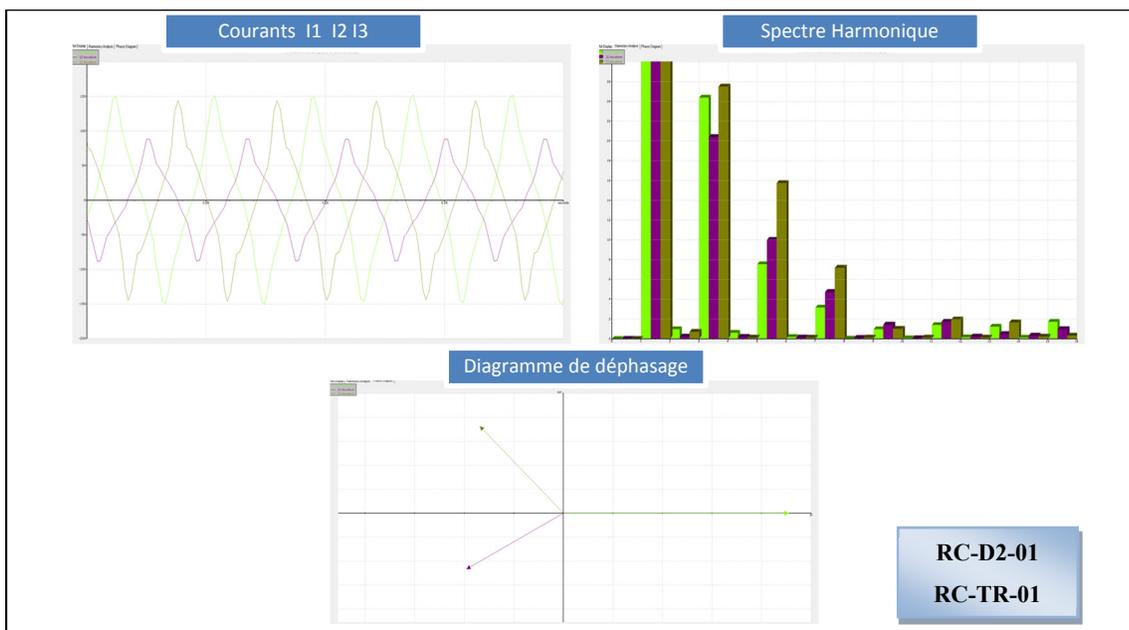


Figure 3.131 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau RC-D2-01 connecté au transformateur RC-TR-01

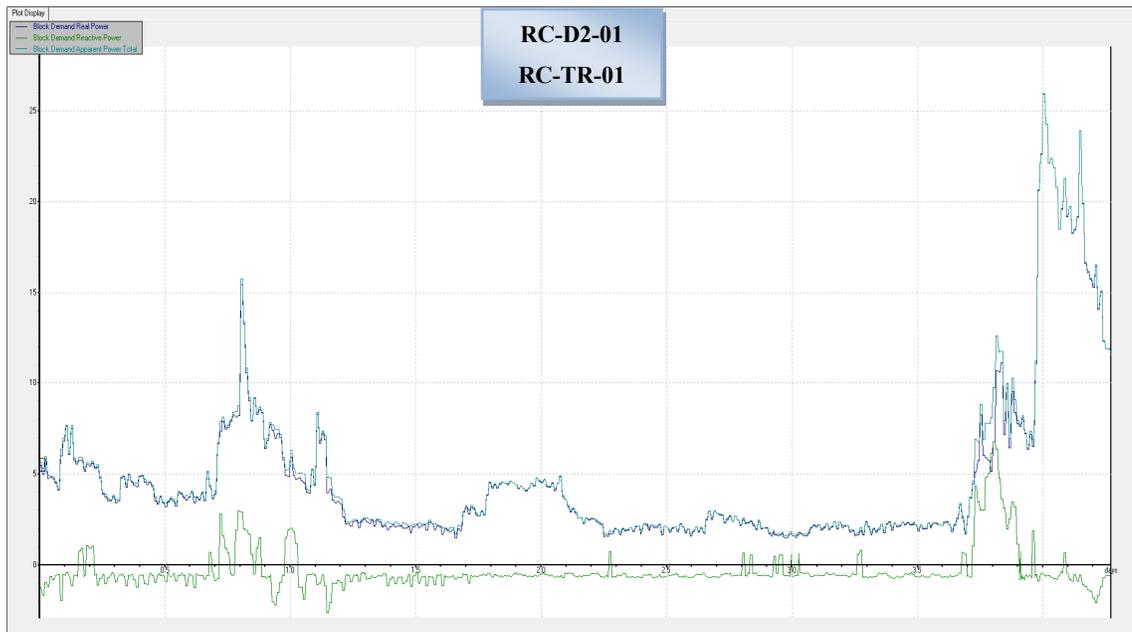


Figure 3.132 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau RC-D2-01-TRANSFO RC-TR-01

Après avoir mesuré en temps réel la charge alimentée par transformateur RC-TR-01, la charge alimentée par un deuxième transformateur installé au 1^{er} étage a été mesurée pareillement. Il s'agit du transformateur 01-TR-01.

Ce transformateur est installé dans la salle B1102, il s'agit d'un transformateur zigzag qui alimente deux augets : l'auget 01-AG-02 qui alimente trois panneaux qui sont les panneaux (11), (12) et (13) et l'auget 01-AG-03 qui alimente deux panneaux (11) et (15). Ces panneaux mentionnés alimentent des prises de service dans le corridor et dans les toilettes, les prises électriques de la salle B-1802 et des locaux comme B-1110, B-1112 et B-1702. De plus, le panneau (15) alimente les serveurs localisés dans la salle où il est installé; il s'agit de la salle B-1666 et les bureaux B-1600.

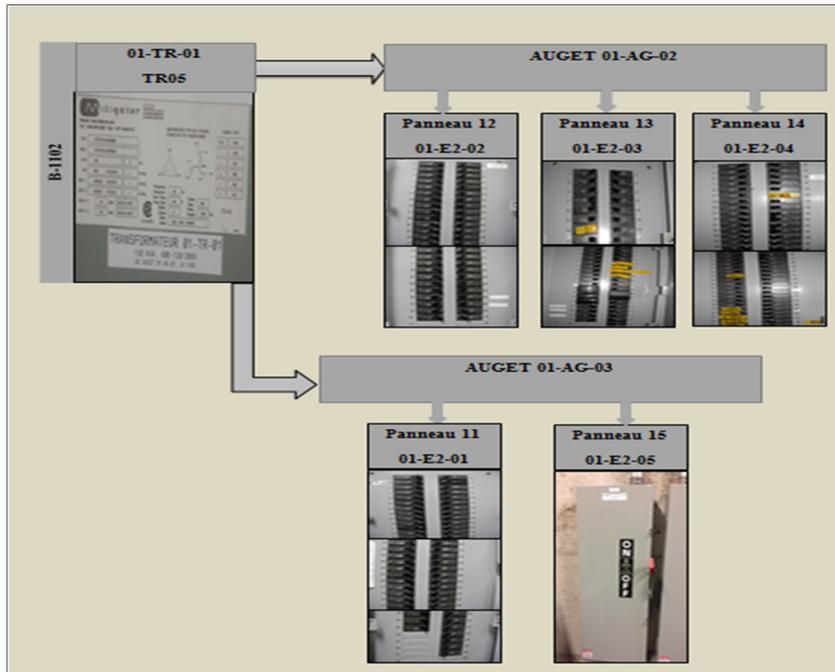


Figure 3.133 Charge alimentée par le transformateur 01-TR-01

Nous présentons dans ce qui suit les résultats des mesures réalisées dans un premier temps au niveau des panneaux (12), (13) et (14) connectés à l'auget 01-AG-02 et dans un deuxième temps au niveau de l'auget 01-AG-03. Il faut juste noter qu'il faut multiplier par le facteur deux les résultats des mesures relatives aux courants et puissances puisque nous n'avons pu mesurer qu'un seul câble parmi deux entrants vers chaque phase de l'auget 01-AG-03.

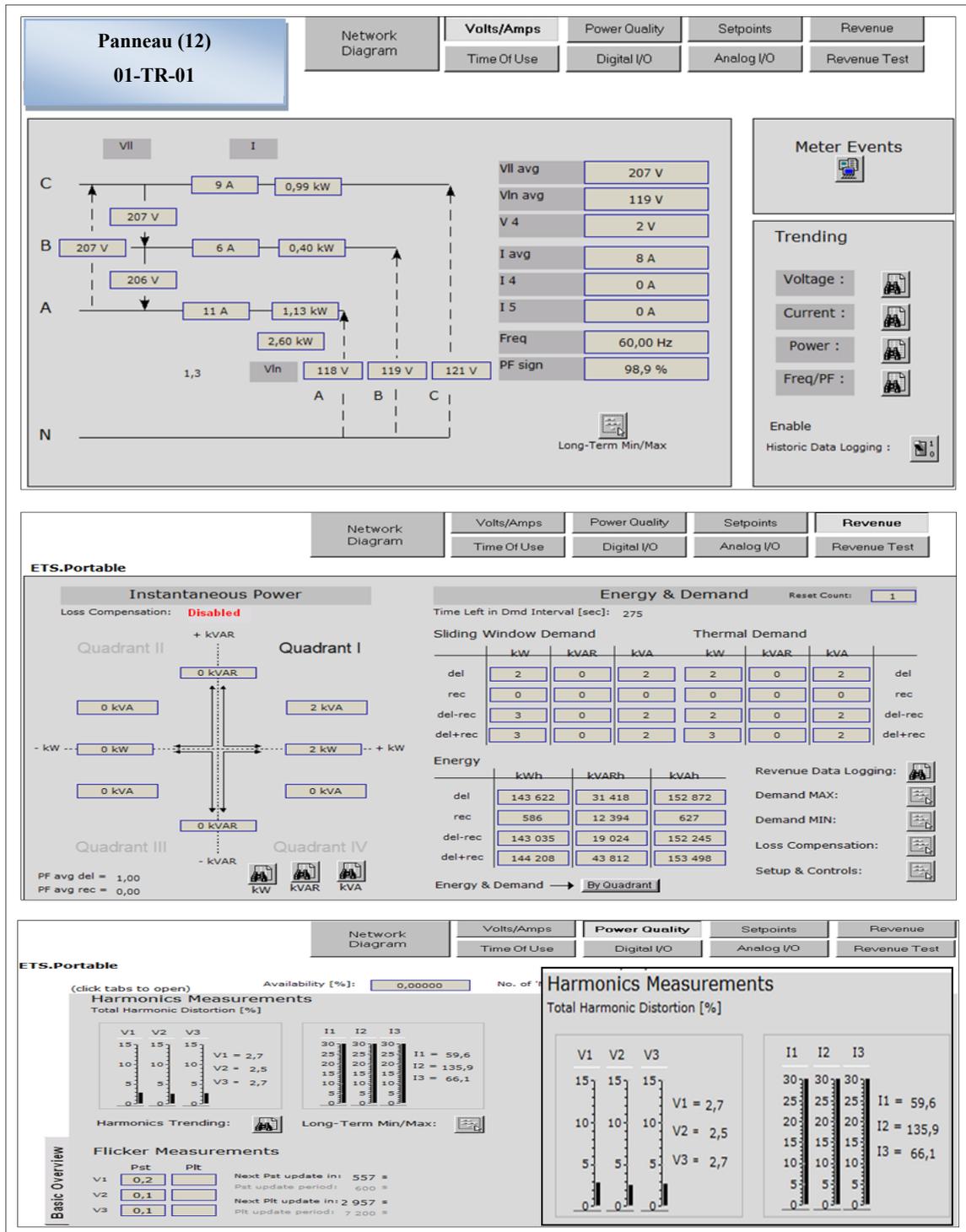


Figure 3.134 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (12)-TRANSFO 01-TR-01

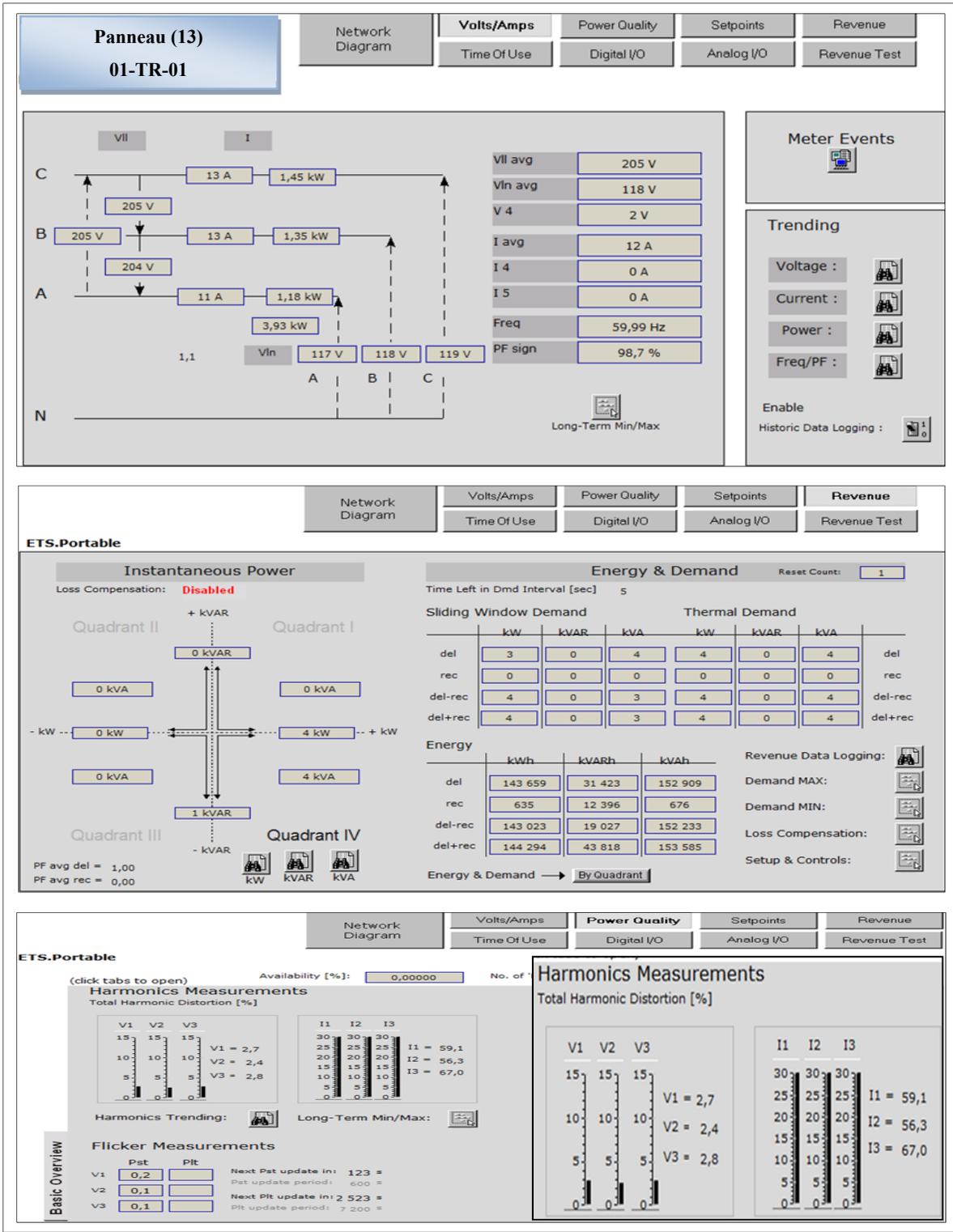


Figure 3.135 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (13)-TRANSFO 01-TR-01

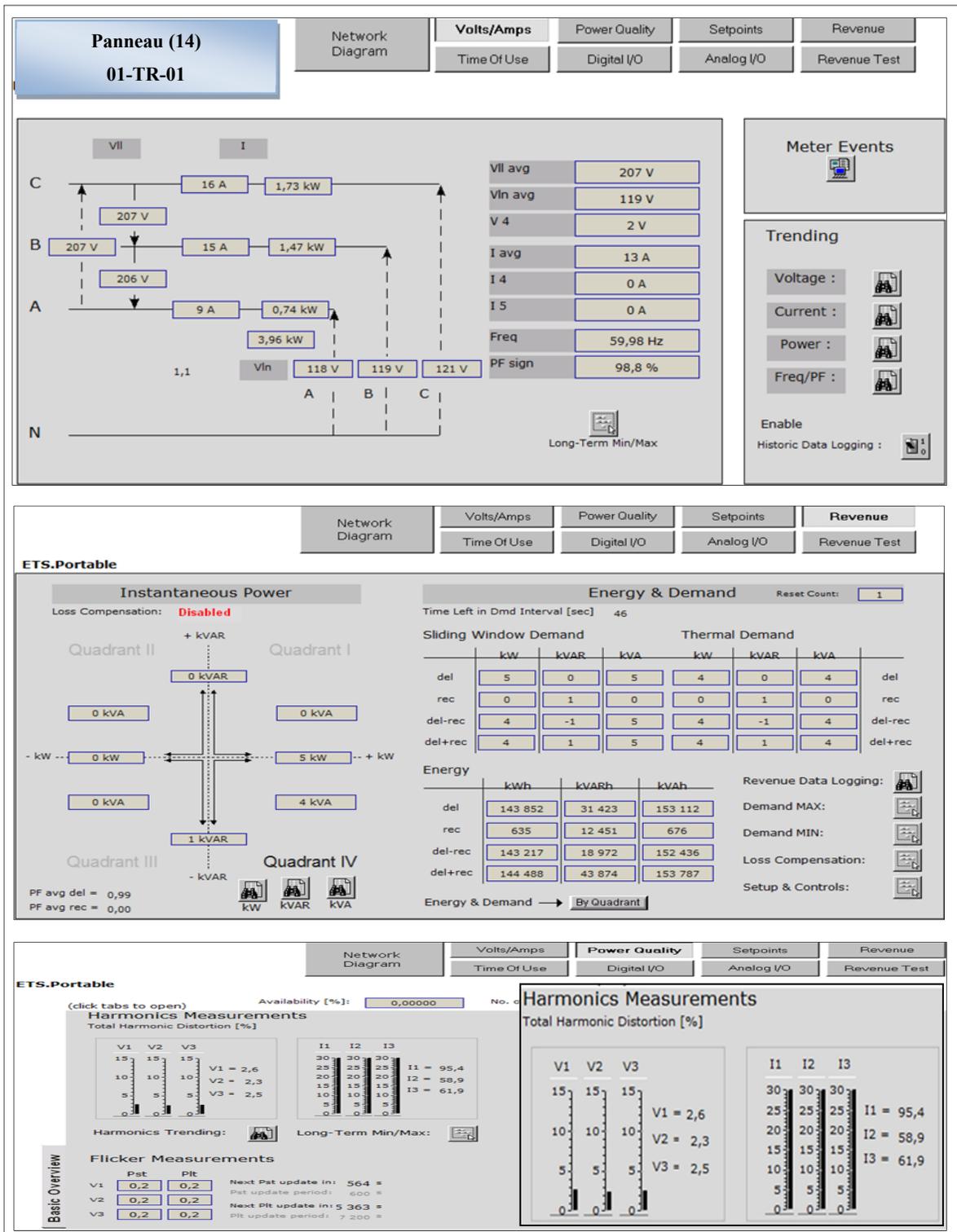


Figure 3.136 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (14)-TRANSFO 01-TR-01

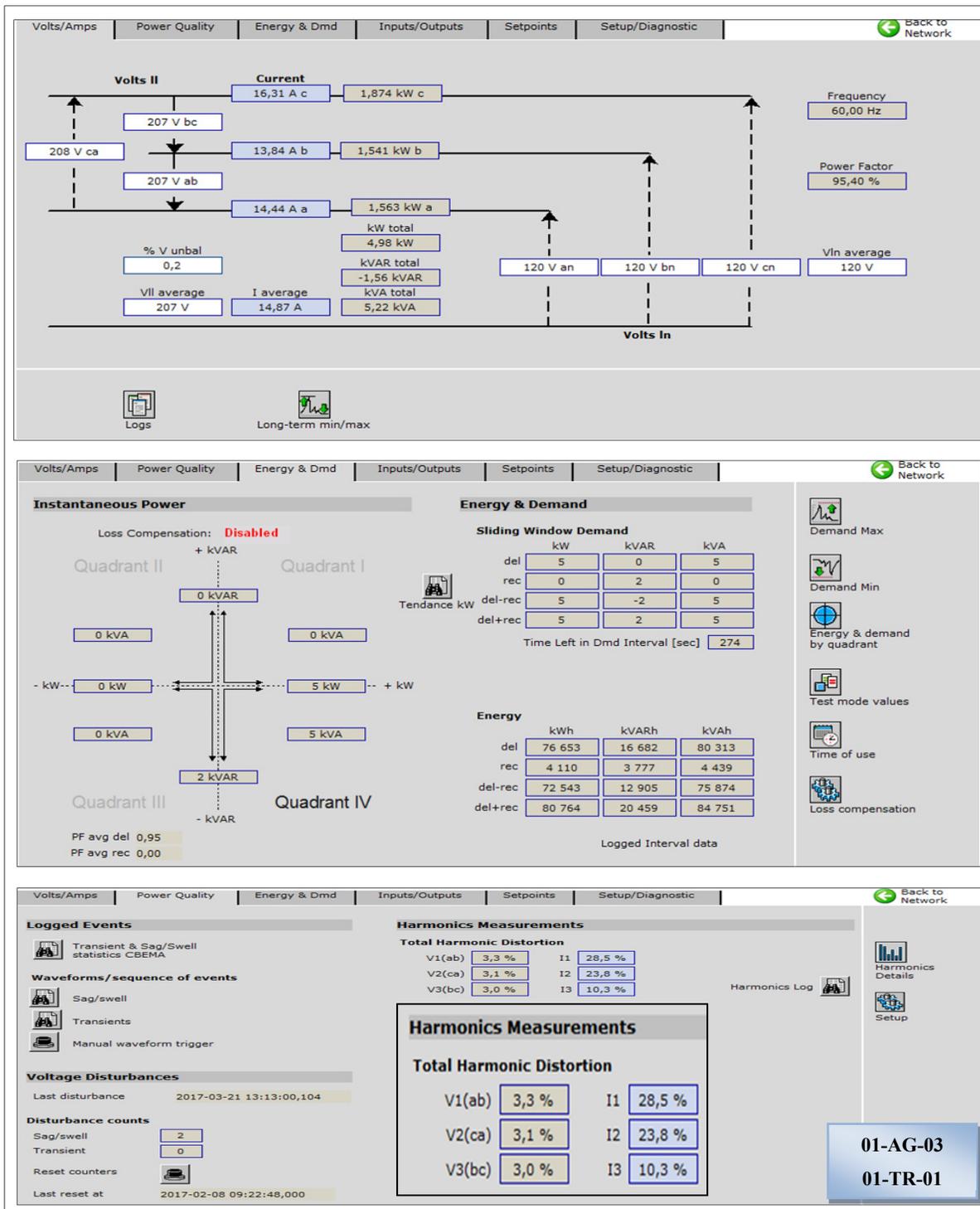


Figure 3.137 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de l'auget 01-AG-03-TRANSFO 01-TR-01

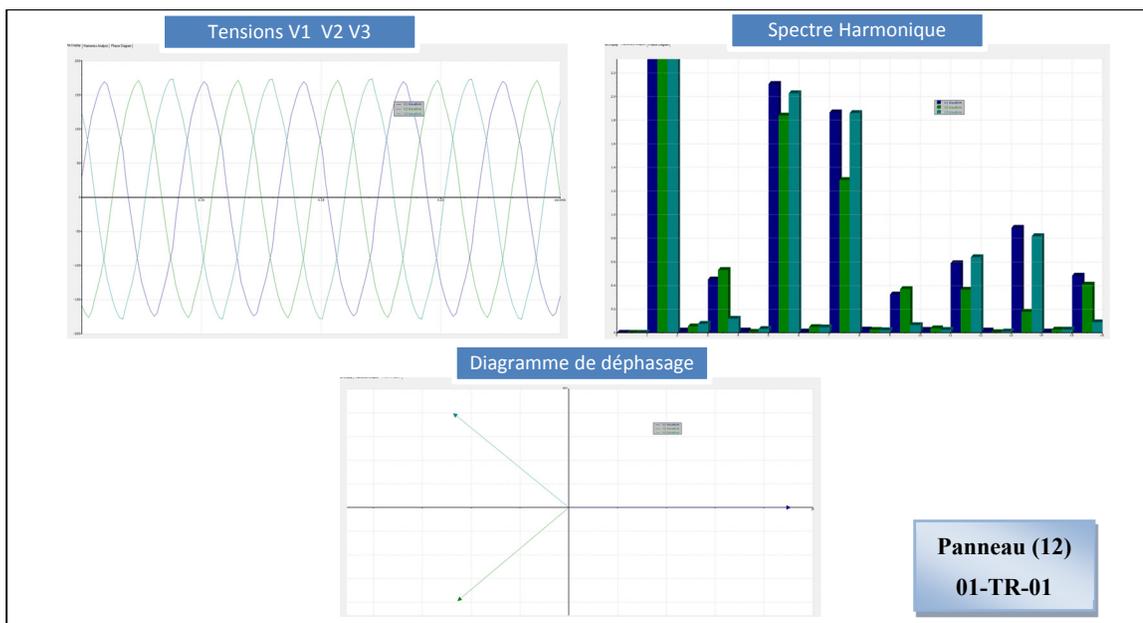


Figure 3.138 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (12)-TRANSFO 01-TR-01

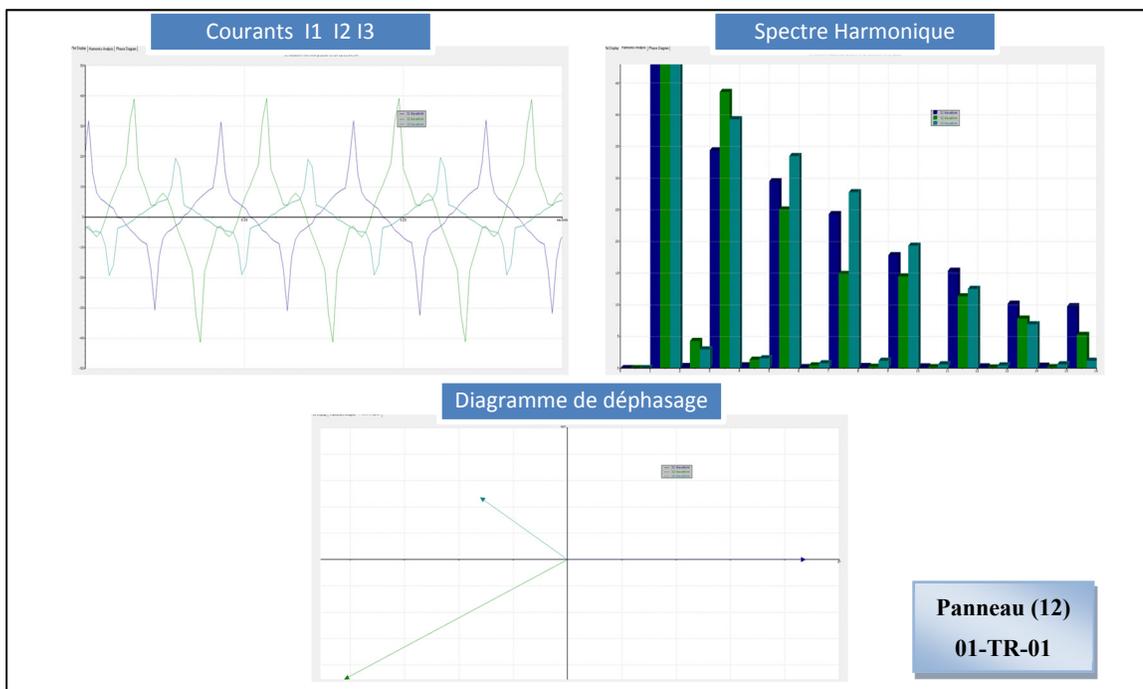


Figure 3.139 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (12)-TRANSFO 01-TR-01

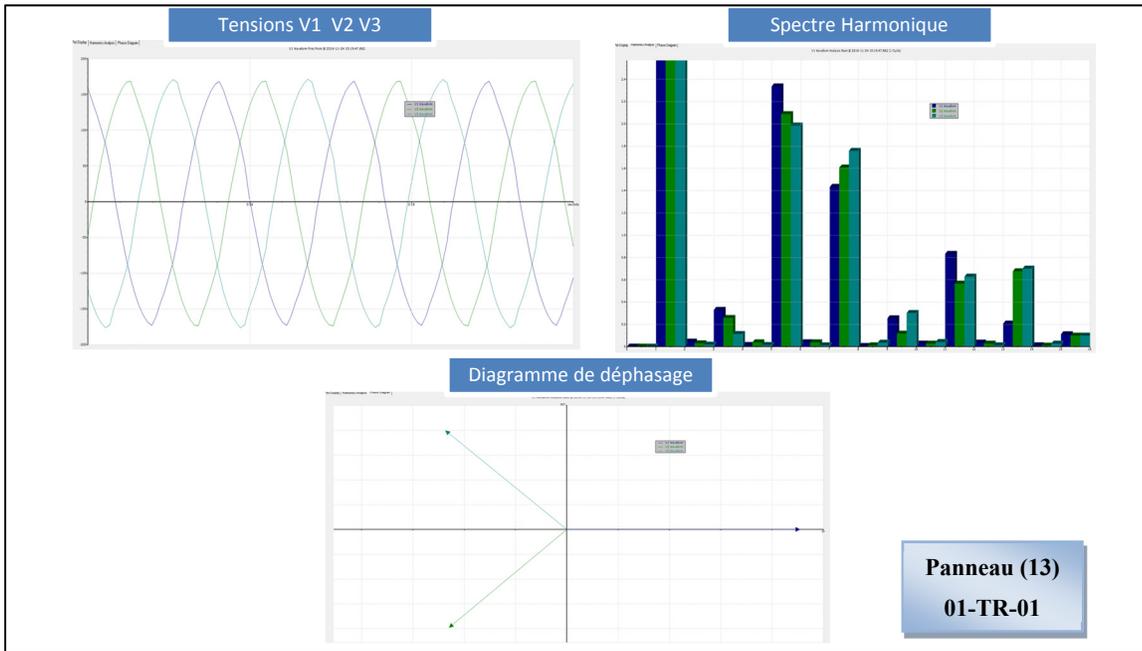


Figure 3.140 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (13)-TRANSFO 01-TR-01

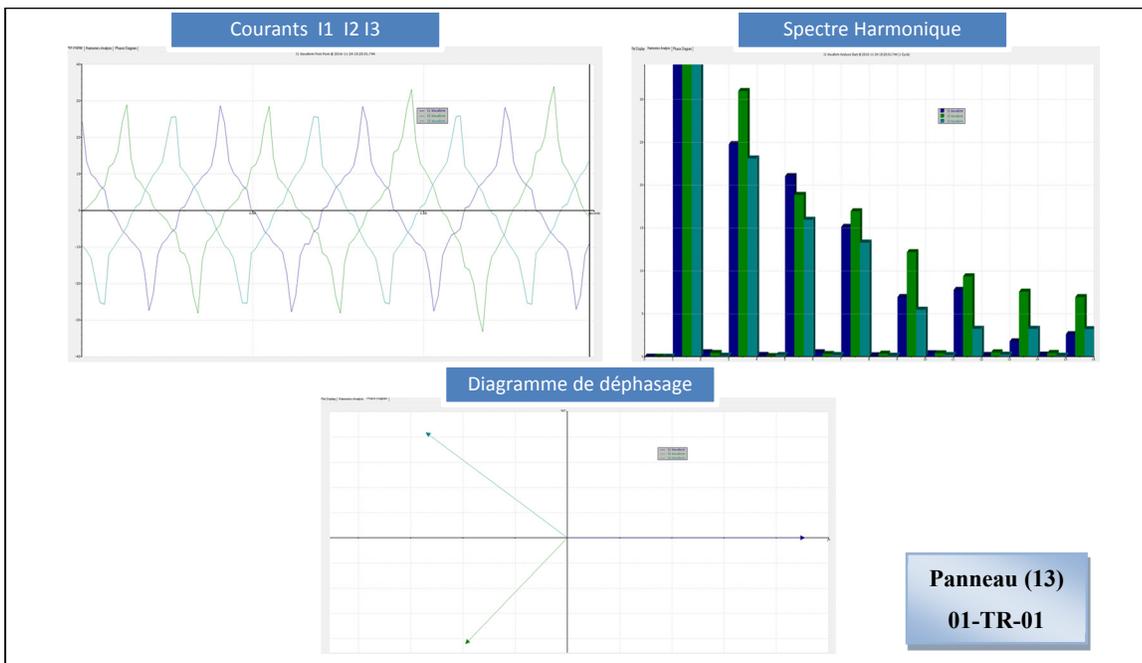


Figure 3.141 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (13)-TRANSFO 01-TR-01

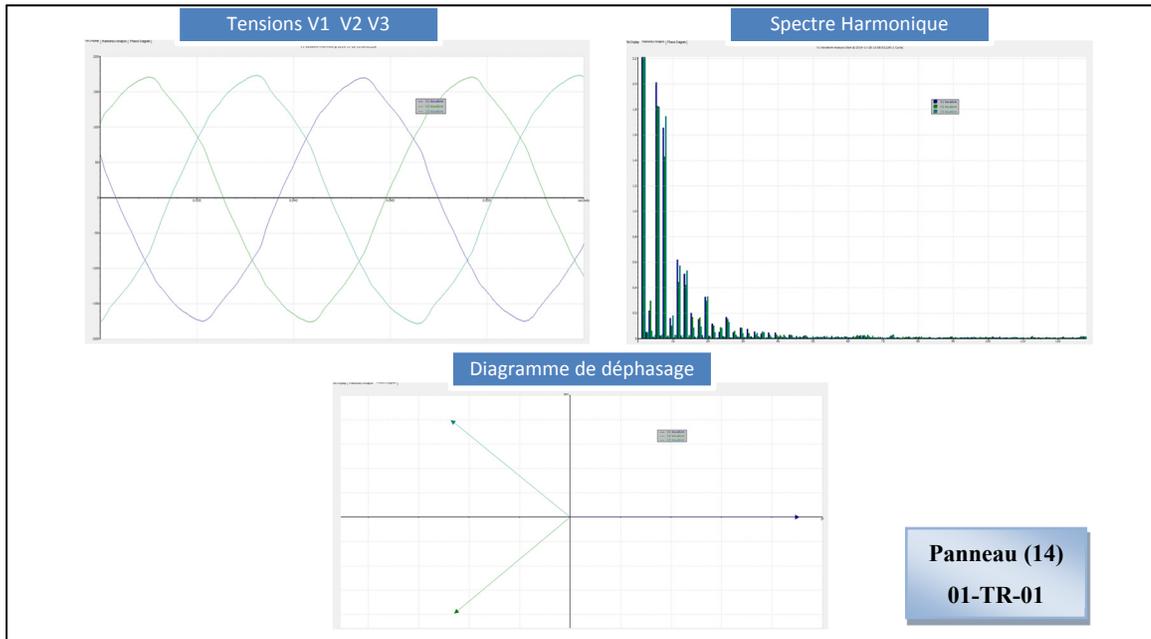


Figure 3.142 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (14)-TRANSFO 01-TR-01

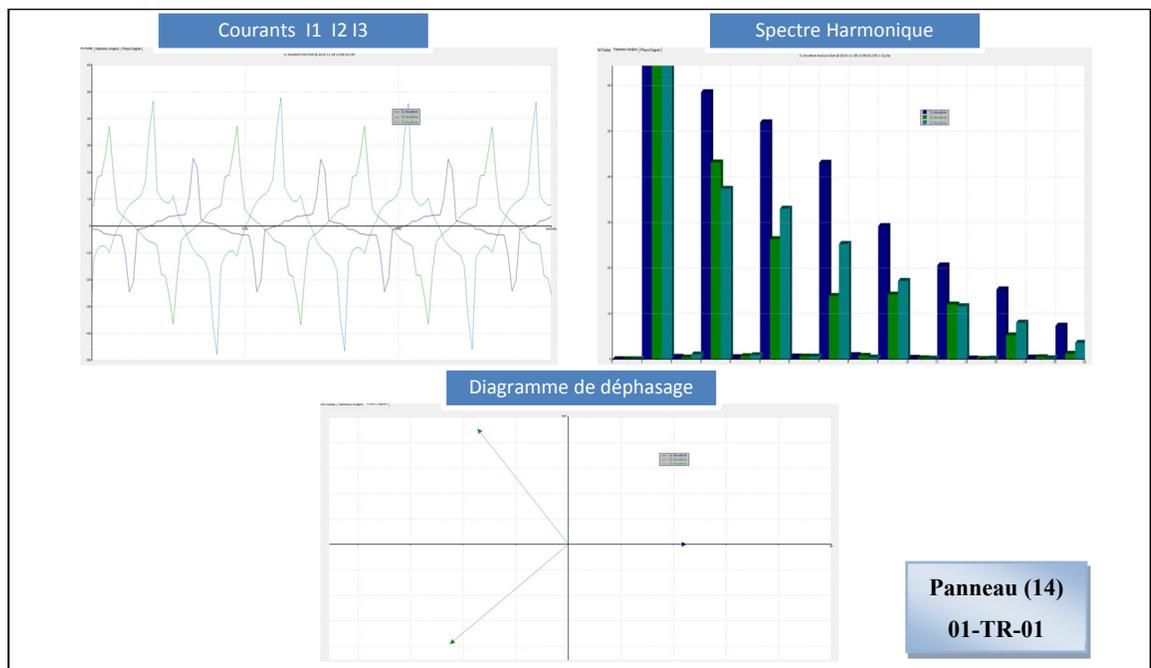


Figure 3.143 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (14)-TRANSFO 01-TR-01

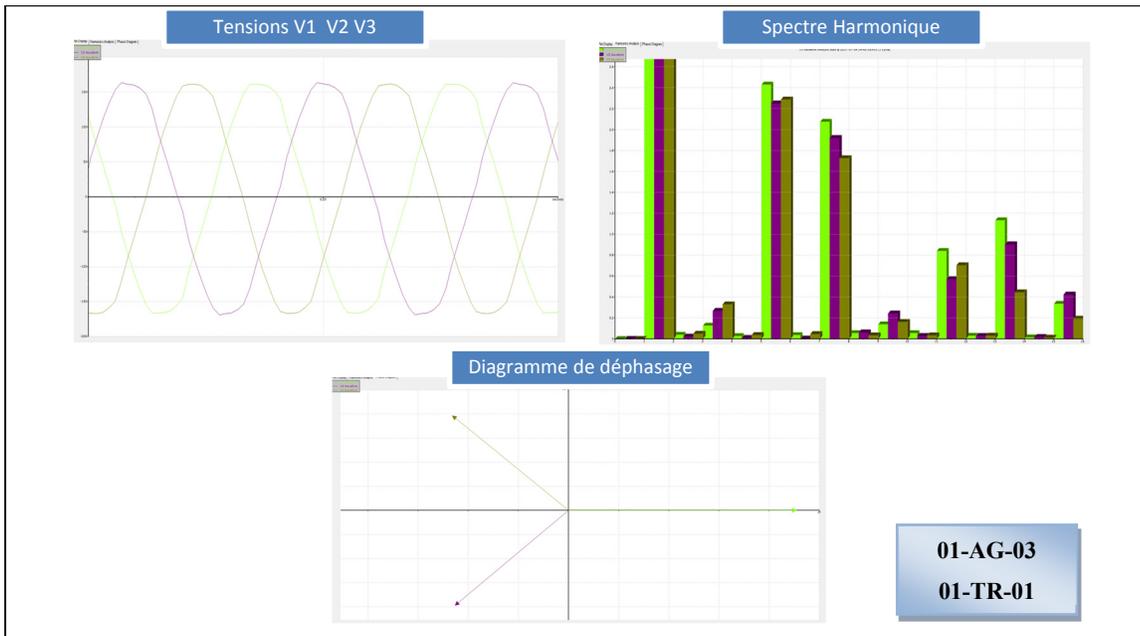


Figure 3.144 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge de l'auget 01-AG-03-TRANSFO 01-TR-01

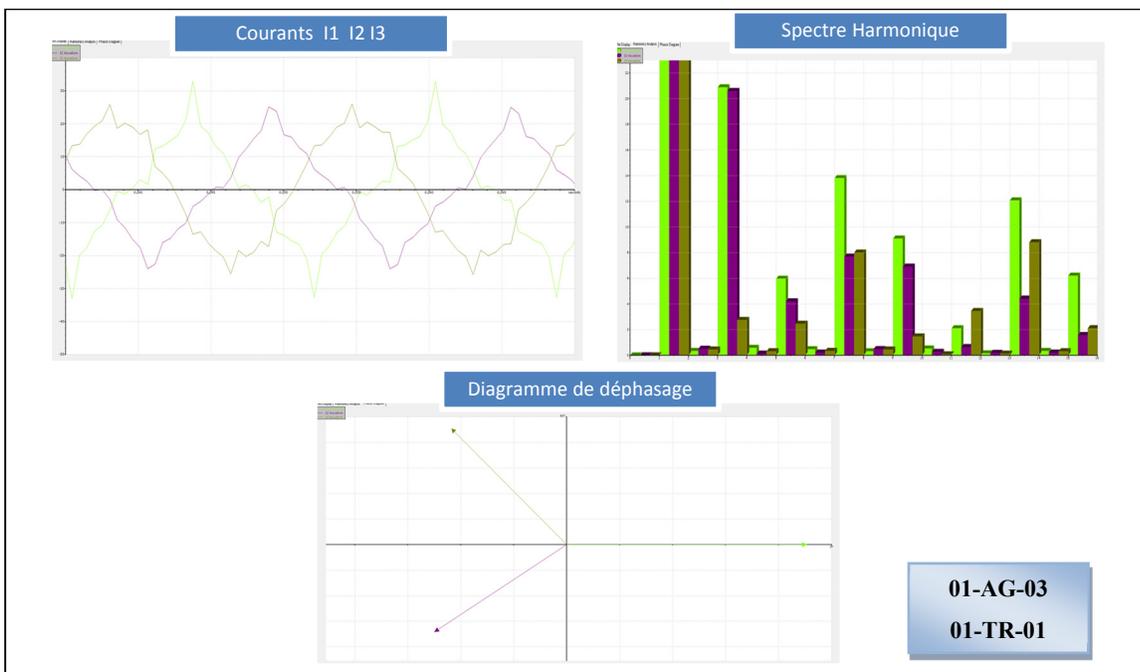


Figure 3.145 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge de l'auget 01-AG-03-TRANSFO 01-TR-01

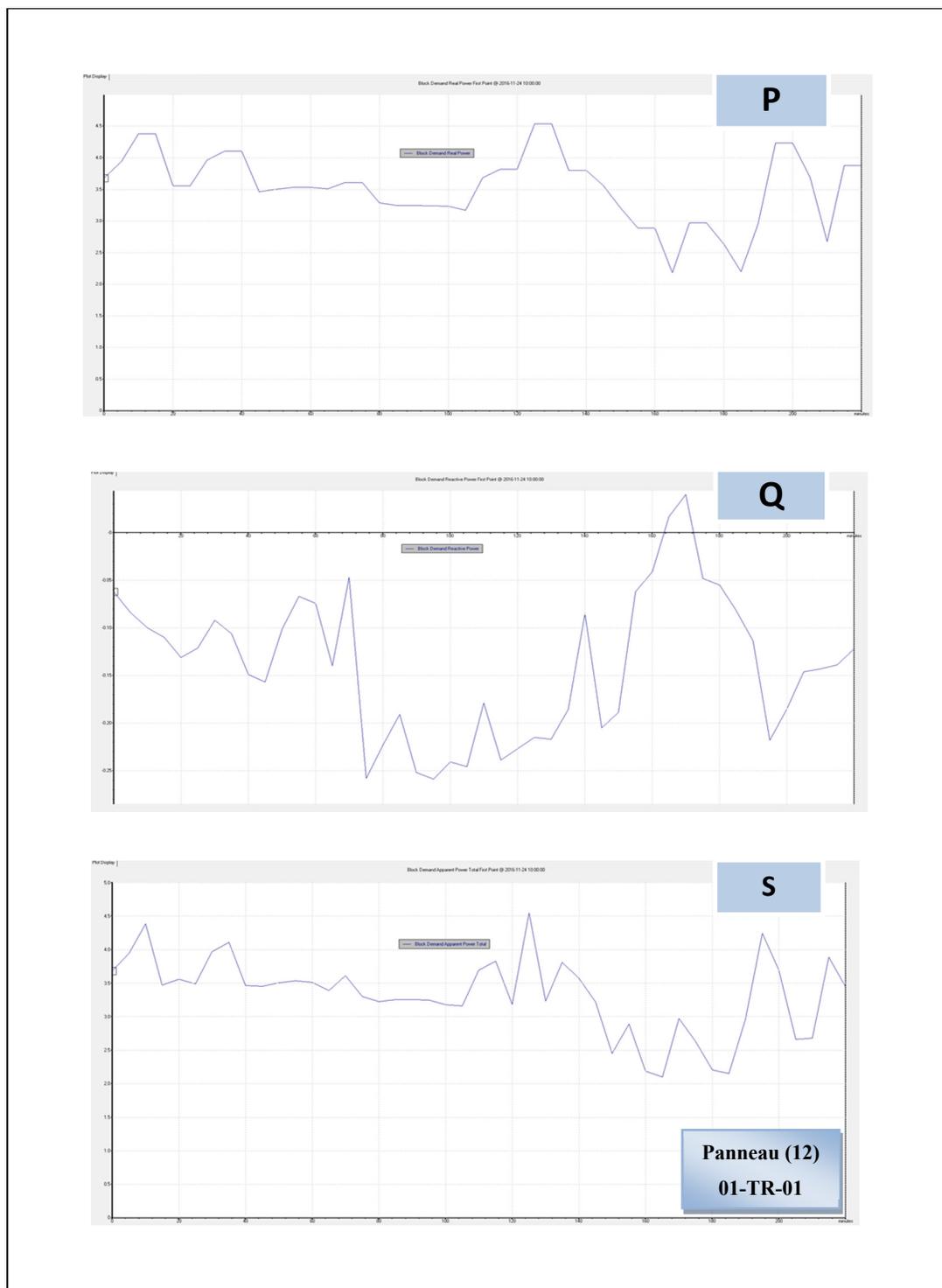


Figure 3.146 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (12)-TRANSFO 01-TR-01

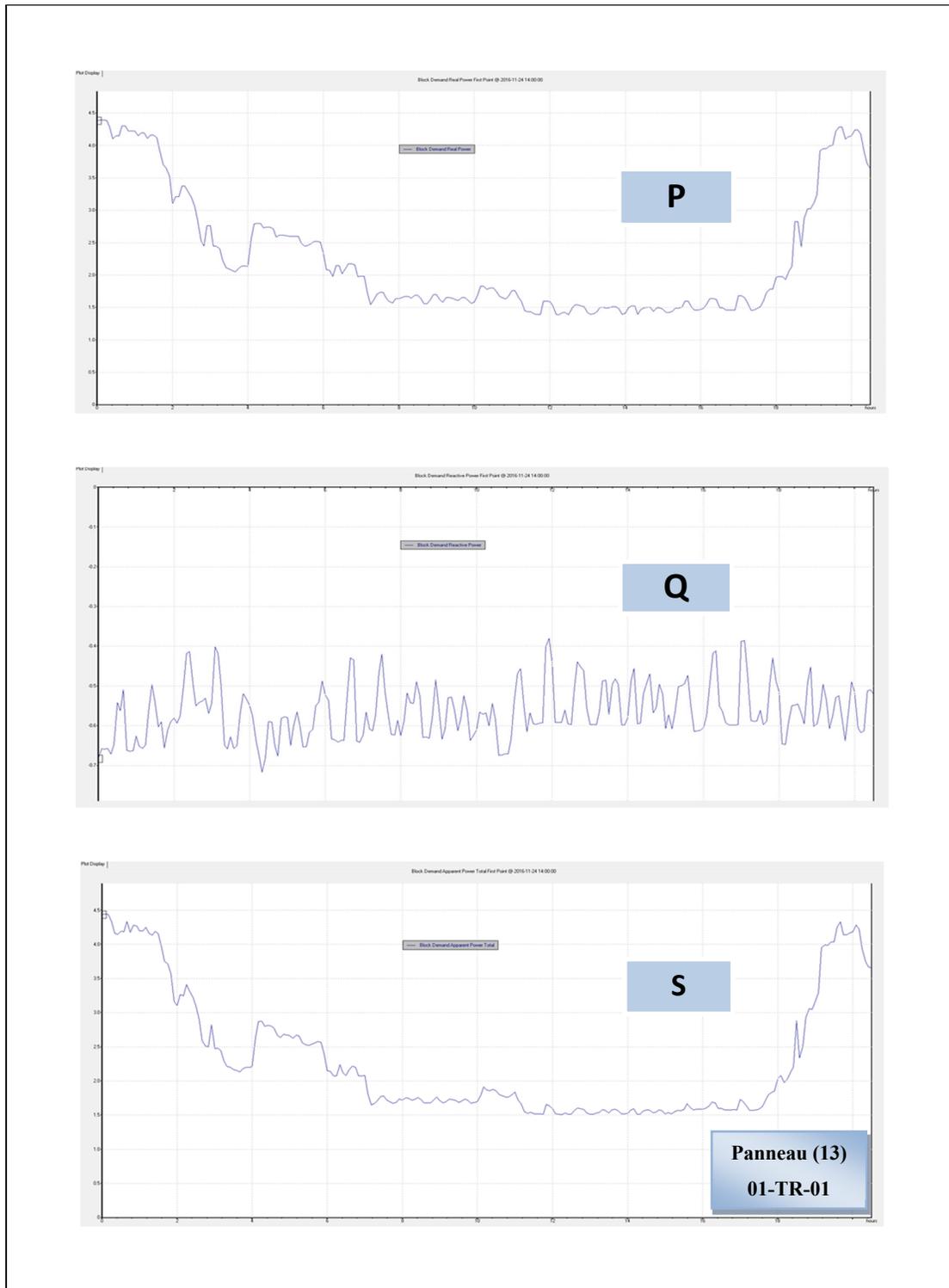


Figure 3.147 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (13)-TRANSFO 01-TR-01

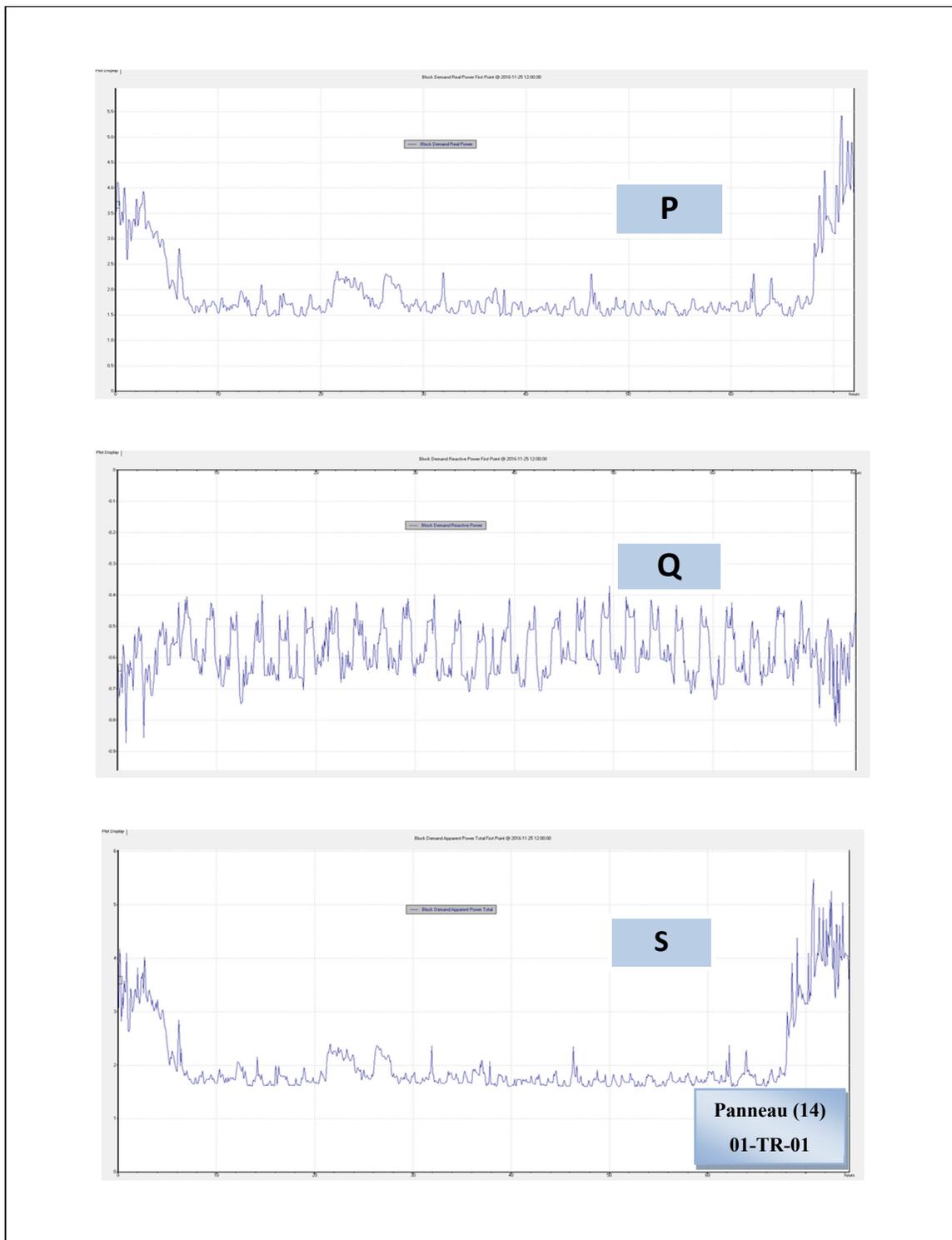


Figure 3.148 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (14)-TRANSFO 01-TR-01

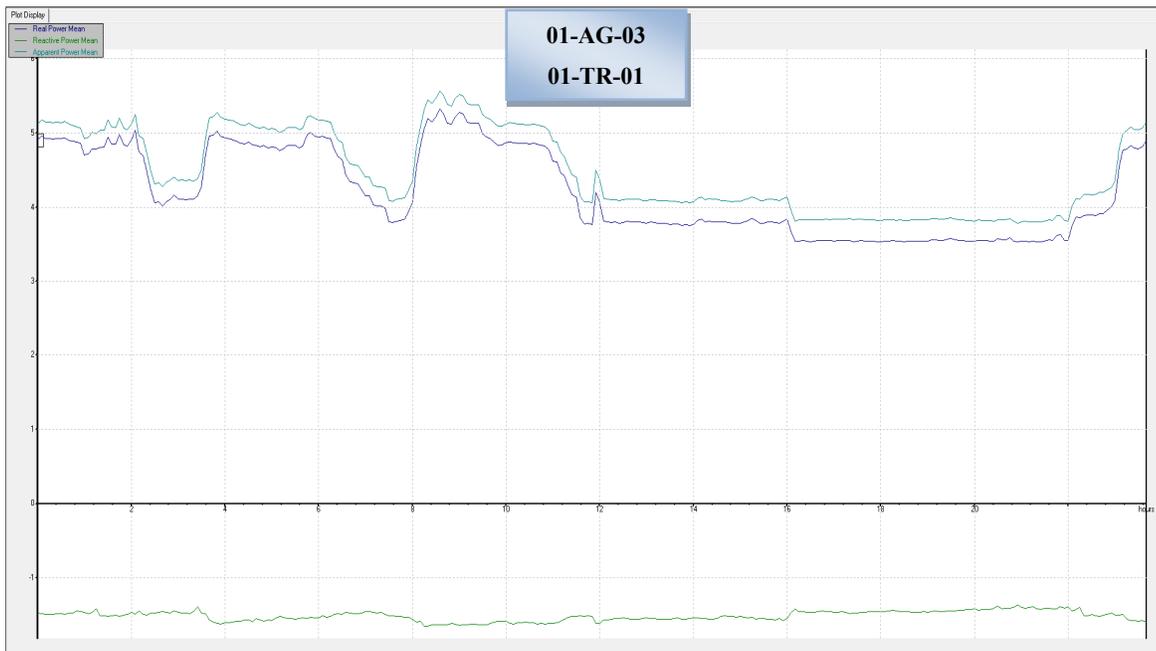


Figure 3.149 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge de l'auget 01-AG-03-TRANSFO 01-TR-01

Par la suite nous avons mesuré la charge alimentée par le transformateur 02-TR-01, qui comme le transformateur 01-TR-01 vu précédemment, alimente deux augets ; 02-AG-02 et 02-AG-03. D'un côté, l'auget 02-AG-02 alimente trois panneaux qui sont (21), (22) et (26) et d'un autre côté, l'auget 02-AG-03 alimente trois autres panneaux (23), (24) et (25).

Différentes charges sont alimentées par ces panneaux telles que des prises de service dans le corridor et les toilettes, des locaux B-2112 et B-2114, la machine-outil installée dans la salle B-2202, le dépoussiéreur installé dans la salle B-2217 et les prises électriques de quelques locaux comme B-21170 et B-2108.

De plus, ces panneaux alimentent aussi la salle de télécom B-2616, la hotte dans B-2630, les projecteurs dans les locaux B-2202, B-2204, B-2206, B-2212, B-2214, B-2620 et B-2622 et les rideaux dans les locaux B-2202, B-2212, B-2214, B-2622 et B-2620. Ils alimentent en plus une robinetterie, un amorceur de siphon, un bassin de neutralisation, des imprimantes

dans les locaux B-2204, B-2501, B-2503, B-2606, B-2608 et B-2628 et des réfrigérateurs dans les locaux B-2234, B-2301, B-2520, et B-2628.

Autres charges sont aussi alimentées par ces panneaux telles que la caméra, les prises de nettoyage, les prises caniveaux des locaux B-2606, B-2608 et B-2206, les comptoirs des locaux B-2234, B-2630 et planchers des locaux B-2628, ainsi que plusieurs locaux qui sont comme suit : B-1302, B-2102, B-2104, B-2106, B-2108, B-2110, B-2200, B-2202, B-2204, B-2211, B-2212, B-2214, B-2216, B-2218, B-2220, B-2222, B-2224, B-2226, B-2226 C, B-2230, B-2232, B-2304, B-2612, B-2614, B-2622, B-2624, B-2626, B-2628, B-2630, B-2500, B-2502, B-2504, B-2506, B-2508, B-2510, B-2512, B-2514, B-2516, B-2518, B-2520, B-2522, B-2524, B-2526, B-2528, B-2530, B-2532, B-2534, B-2536, B-2538, B-2546, B-2548, B-2550, B-2552, B-2554, B-2556, B-2558, B-2560, B-2562, B-2564, B-2566, B-2568, B-2606, B-2610, B-2632.

Pour finir, ces panneaux et plus précisément ceux qui sont alimentés par l'auget 02-AG-03 alimentent toutes les machines et les équipements installés dans le département cheminement universitaire et technologique.

La figure 3.150 visualise la charge totale alimentée par le transformateur 02-TR-01.

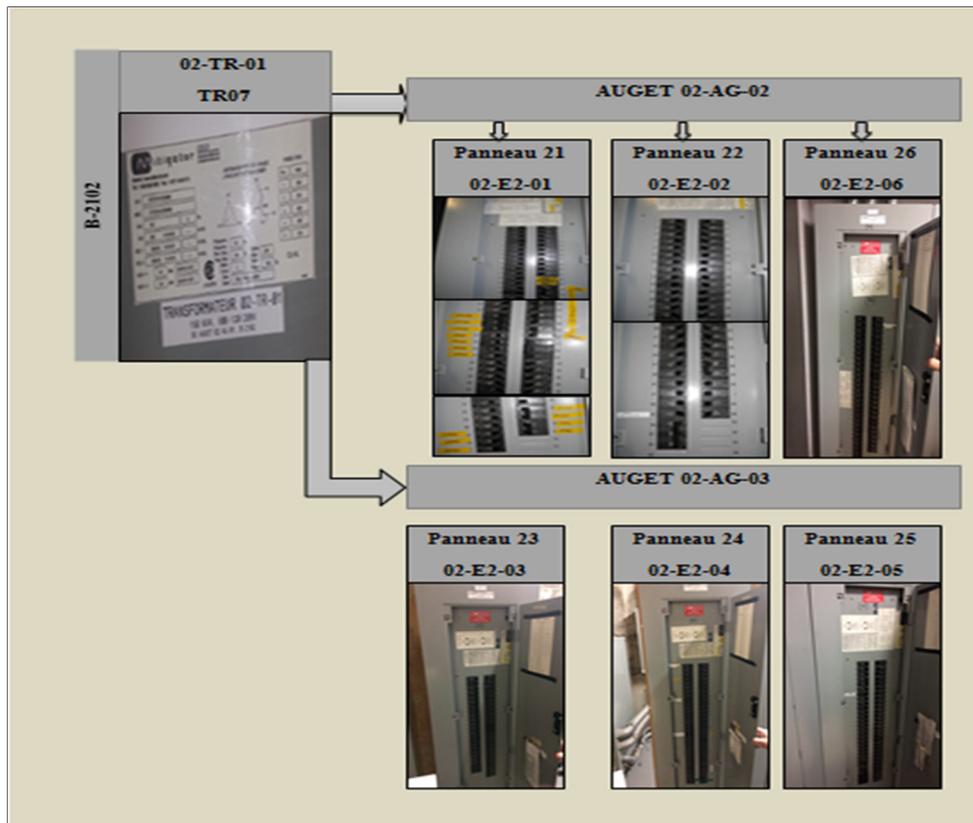


Figure 3.150 Charge alimentée par le transformateur 02-TR-01

Des mesures de la charge au niveau de chaque panneau connecté à l'auget 02-AG-02 et au niveau de l'auget 02-AG-03 ont été réalisées, Il faut juste noter qu'il faut multiplier par le facteur deux les mesures relatives aux courants et puissances puisque nous n'avons pu mesurer qu'un seul câble parmi deux entrants vers chaque phase de l'auget 02-AG-03. Les résultats ainsi obtenus sont présentés comme suit :

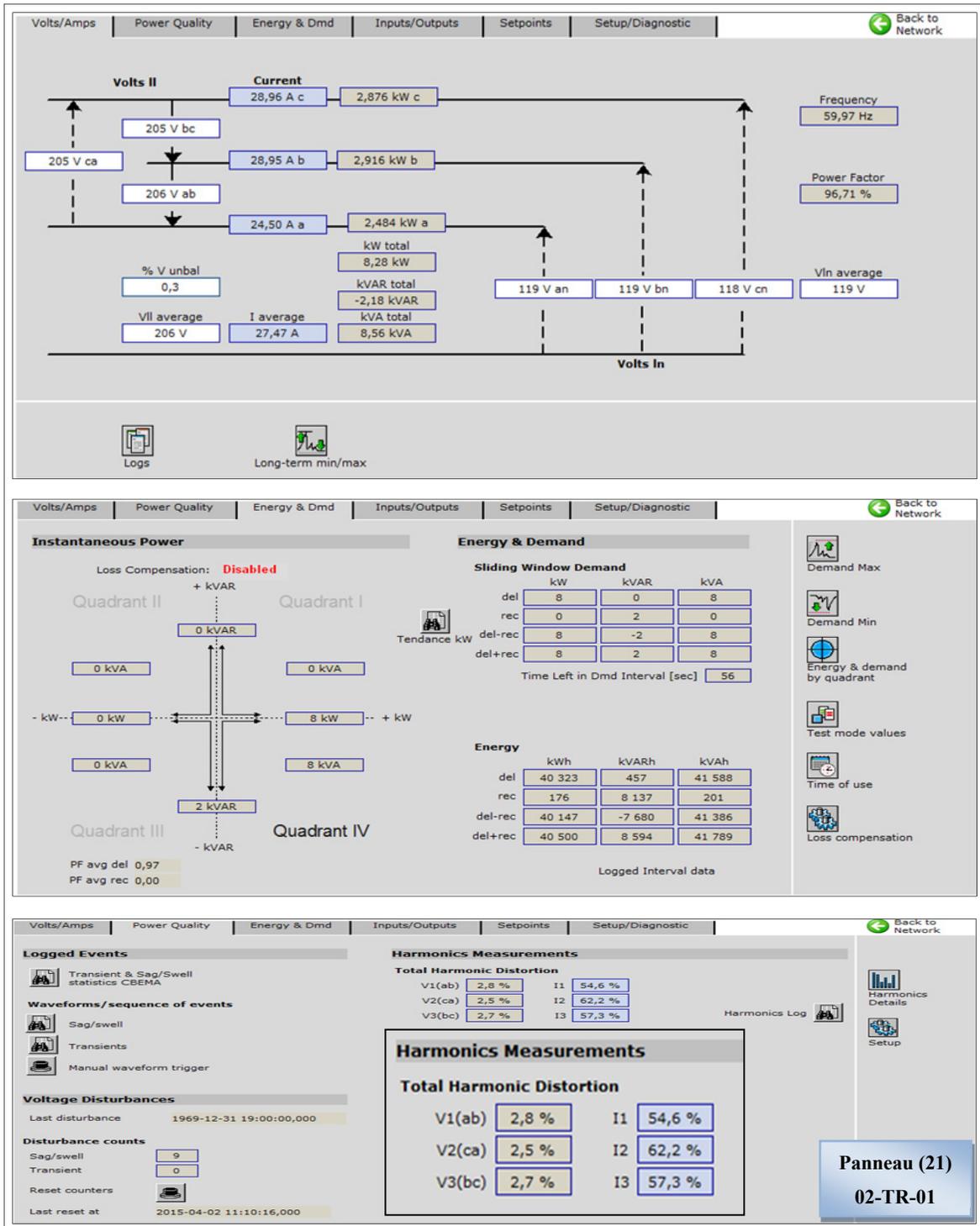


Figure 3.151 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (21)-TRANSFO 02-TR-01

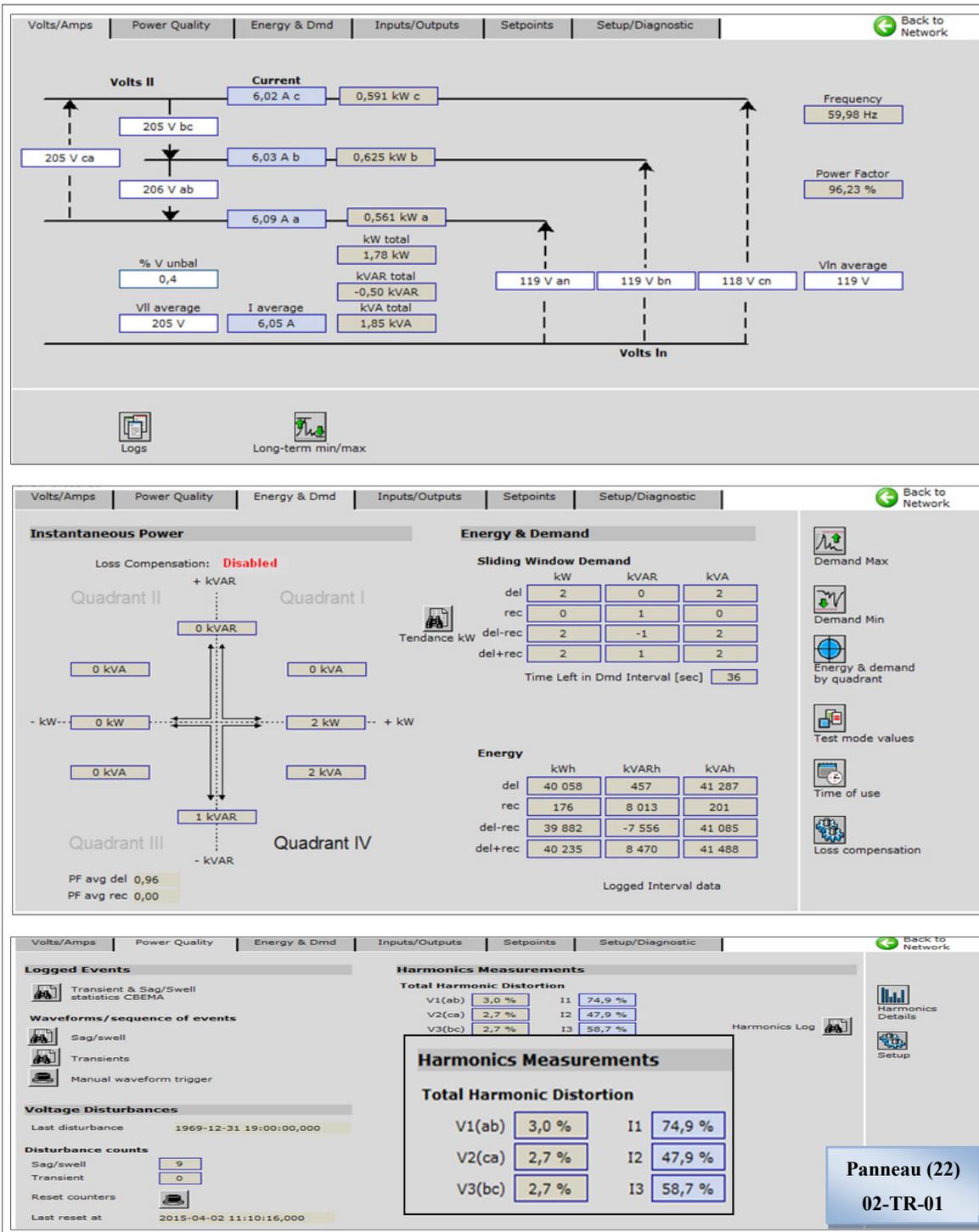


Figure 3.152 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (22)-TRANSFO 02-TR-01

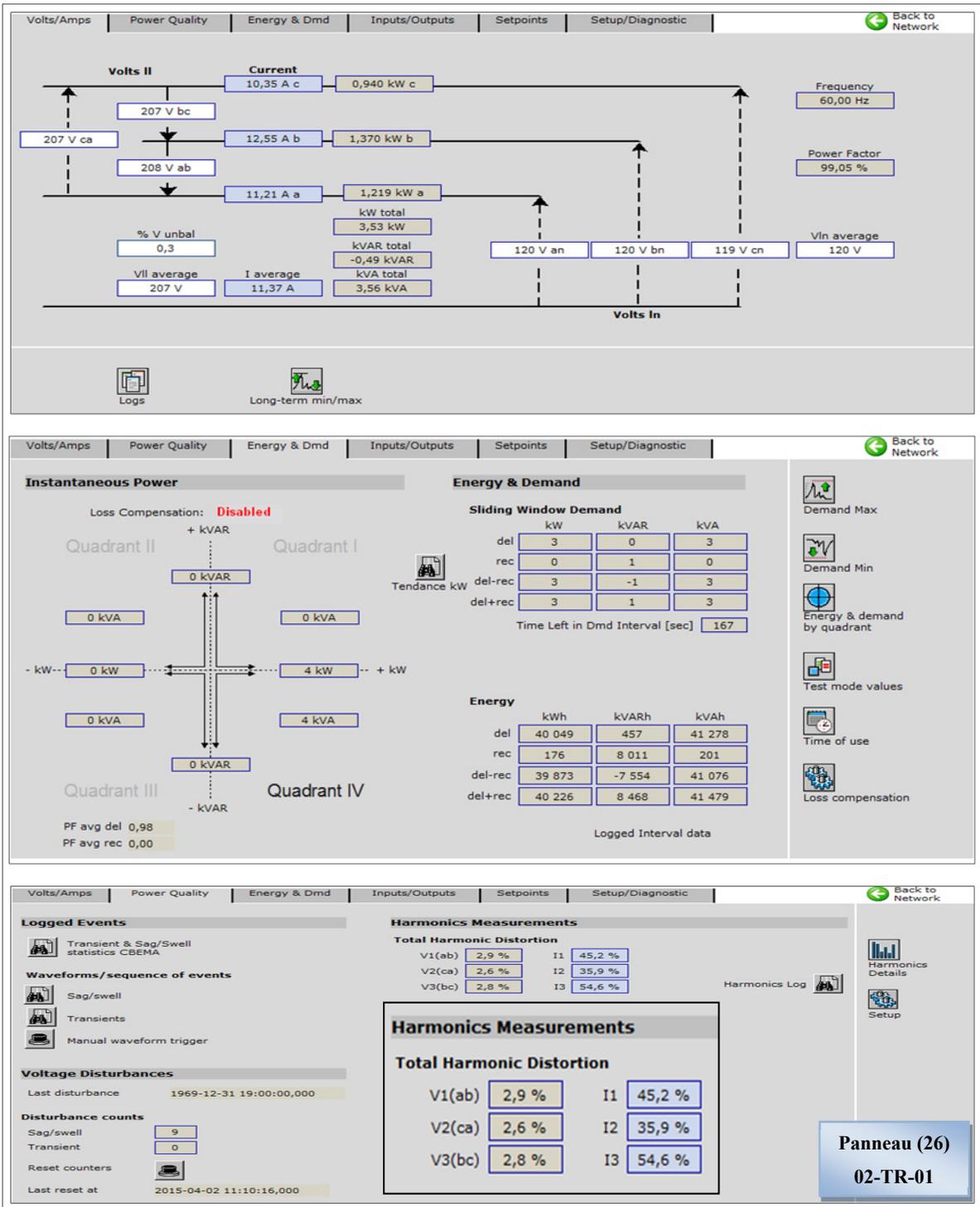


Figure 3.153 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (26)-TRANSFO 02-TR-01

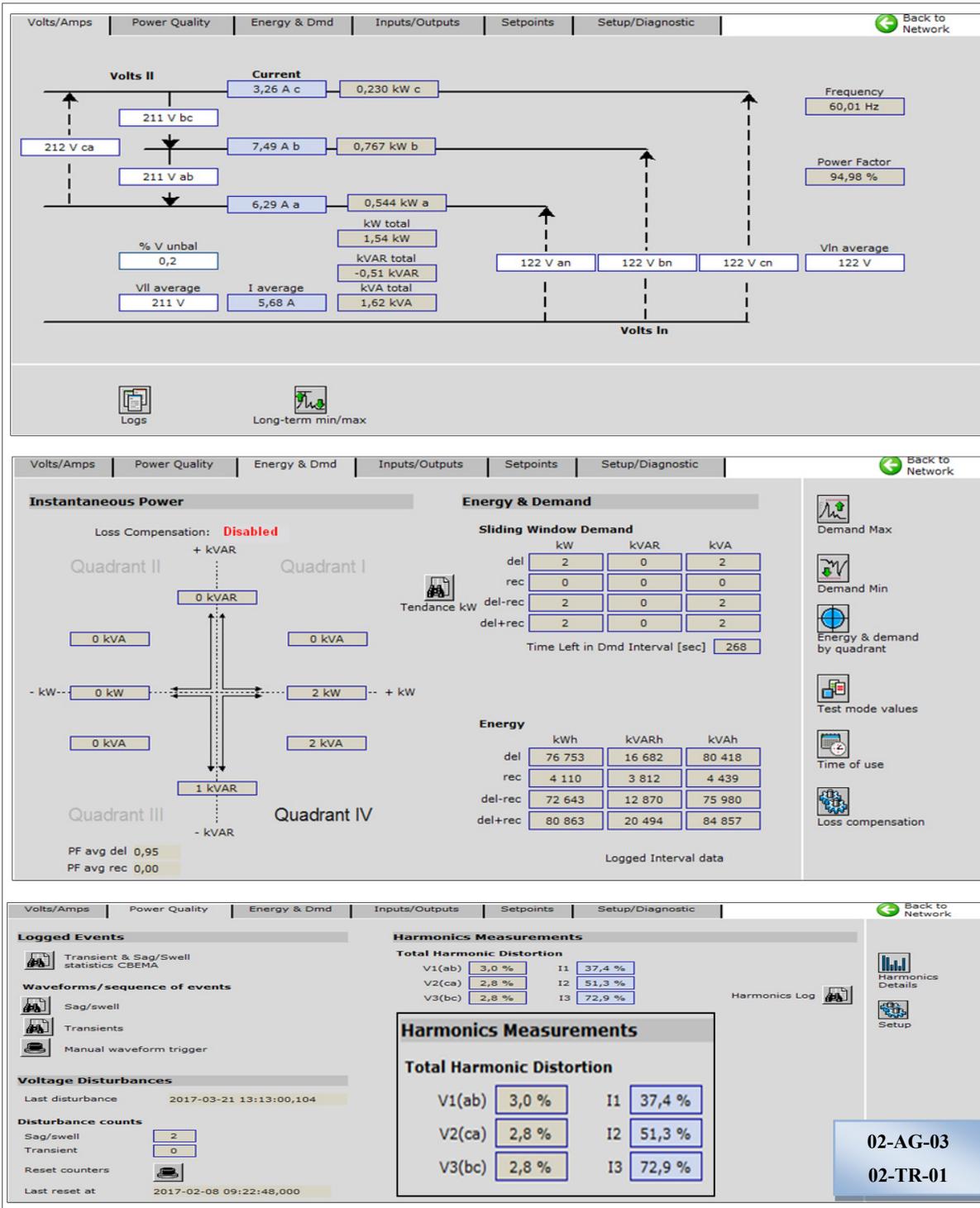


Figure 3.154 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de l'auger 02-AG-03-TRANSFO 02-TR-01

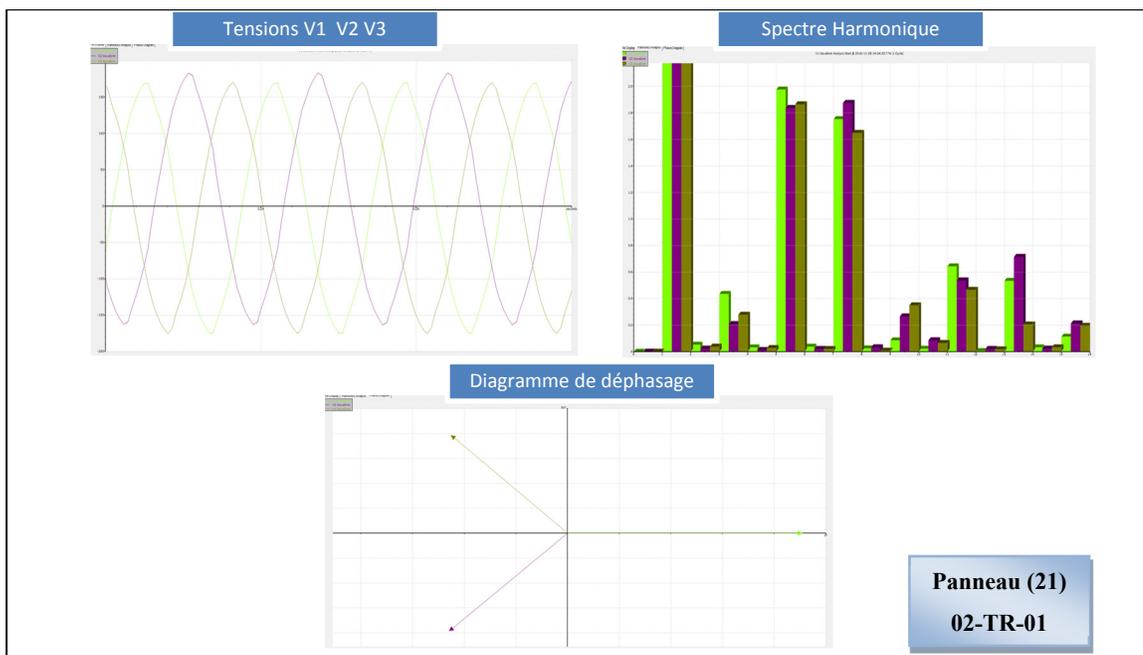


Figure 3.155 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (21)-TRANSFO 02-TR-01

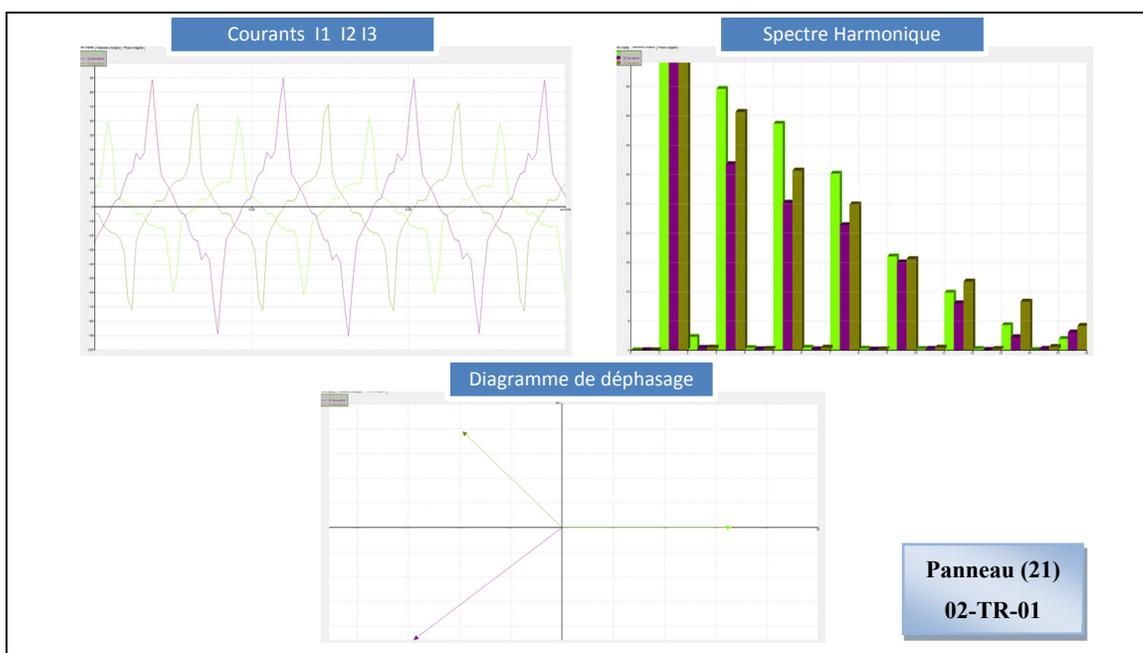


Figure 3.156 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (21)-TRANSFO 02-TR-01

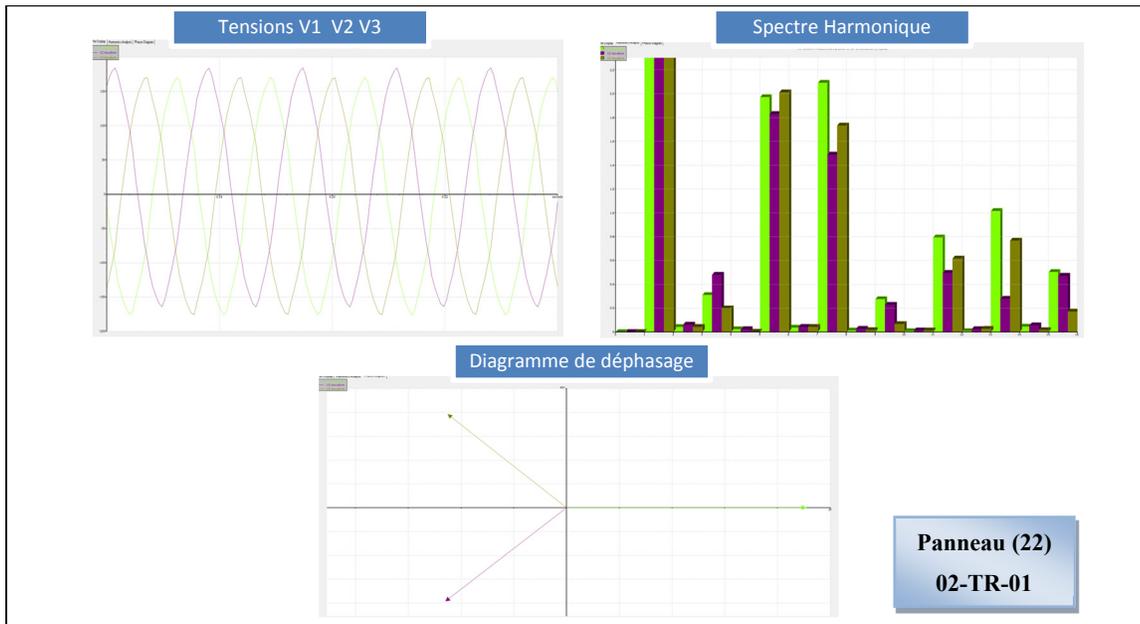


Figure 3.157 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (22)-TRANSFO 02-TR-01

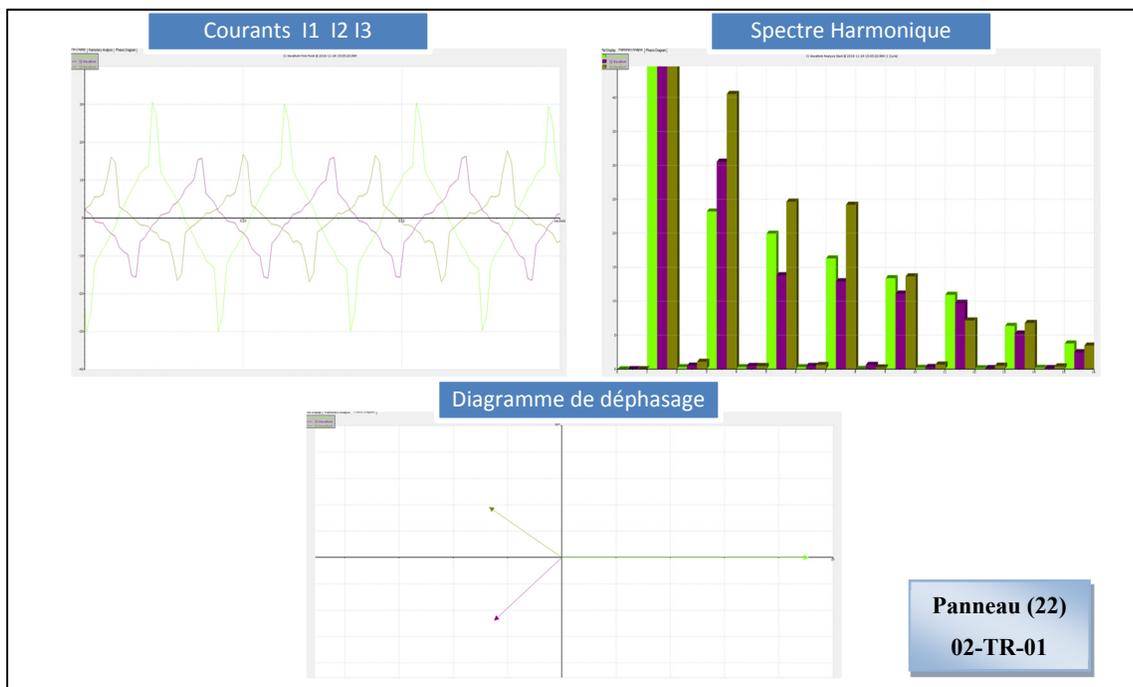


Figure 3.158 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (22)-TRANSFO 02-TR-01

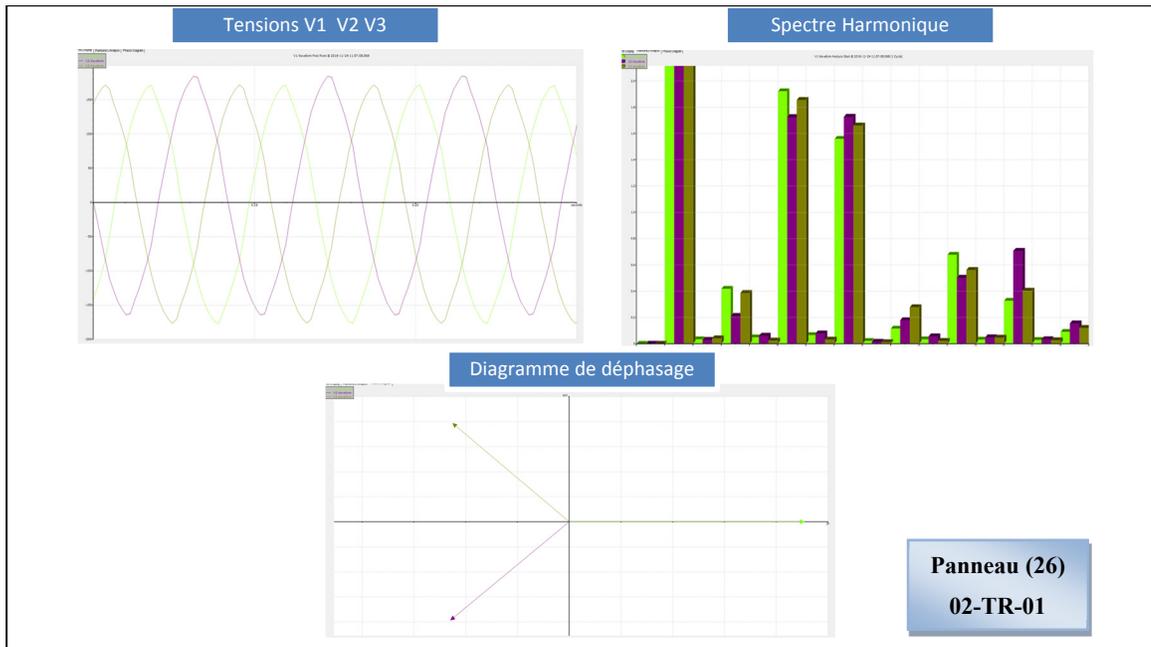


Figure 3.159 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (26)-TRANSFO 02-TR-01

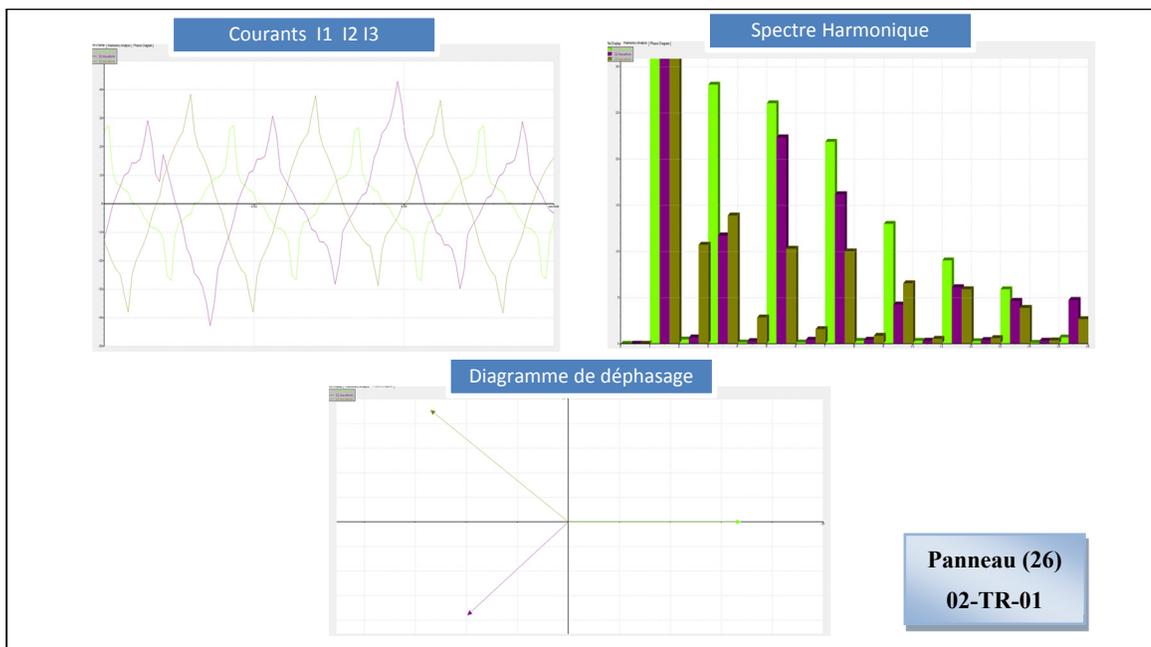


Figure 3.160 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (26)-TRANSFO 02-TR-01

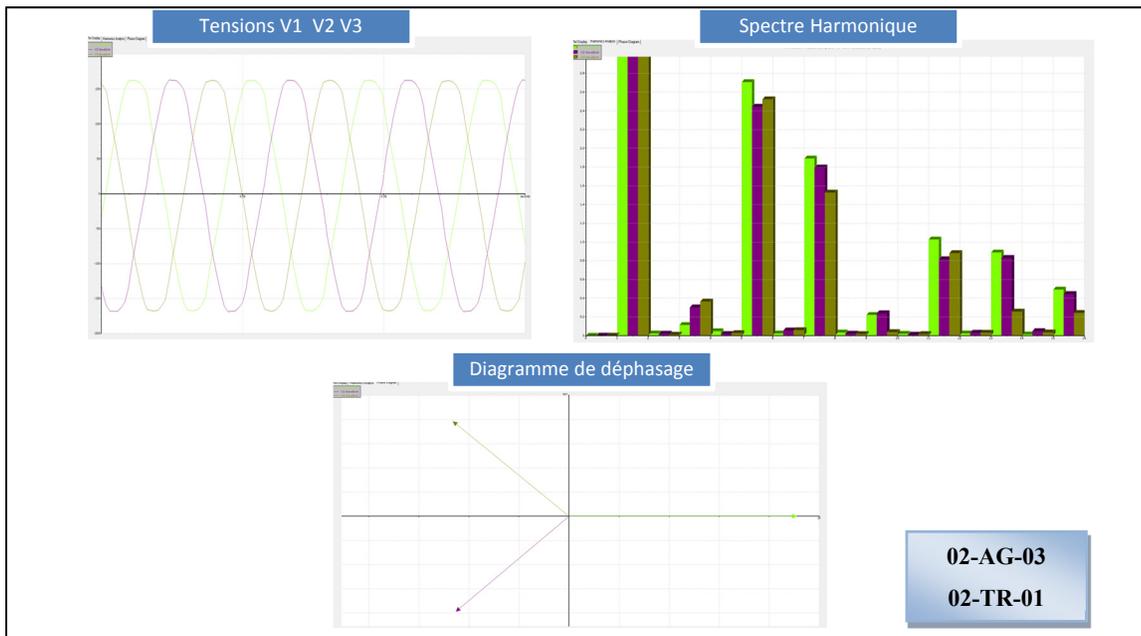


Figure 3.161 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge de l’auget 02-AG-03-TRANSFO 02-TR-01



Figure 3.162 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge de l’auget 02-AG-03-TRANSFO 02-TR-01

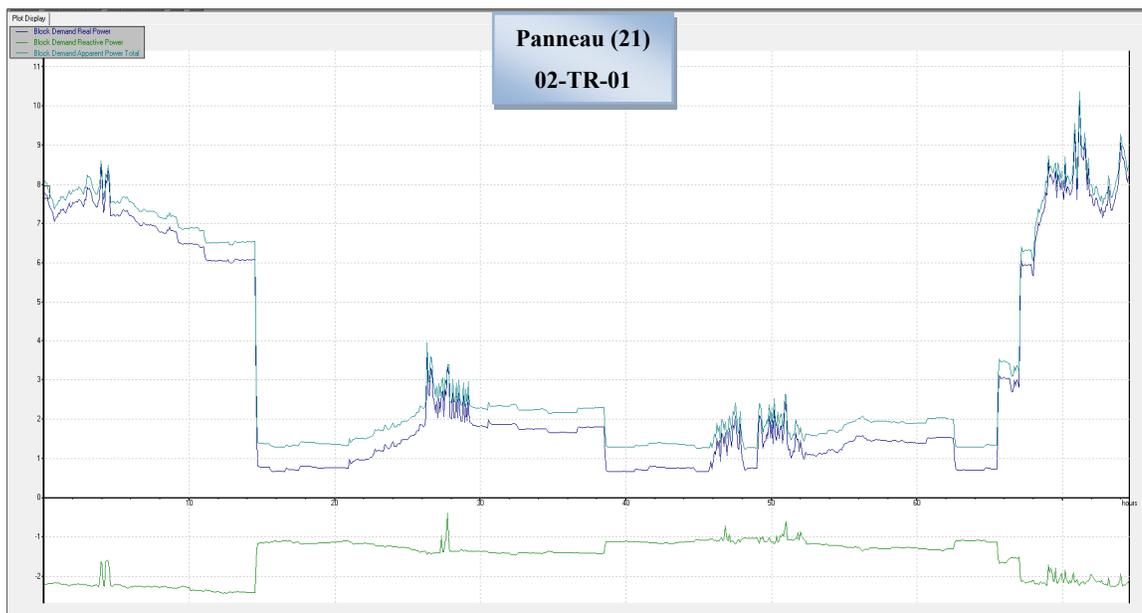


Figure 3.163 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (21)-TRANSFO 02-TR-01

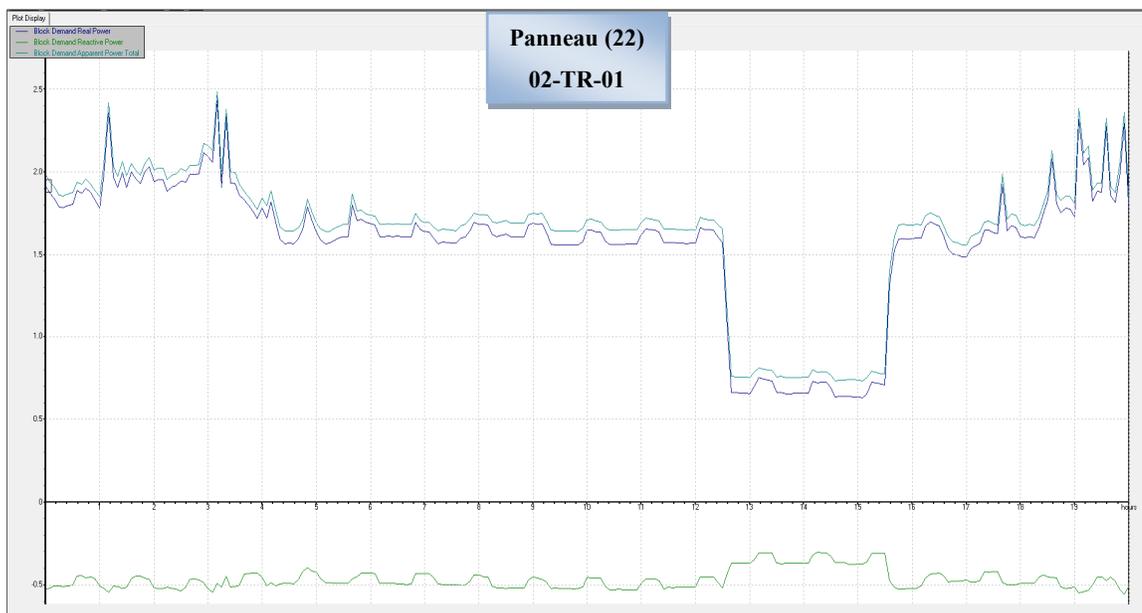


Figure 3.164 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (22)-TRANSFO 02-TR-01

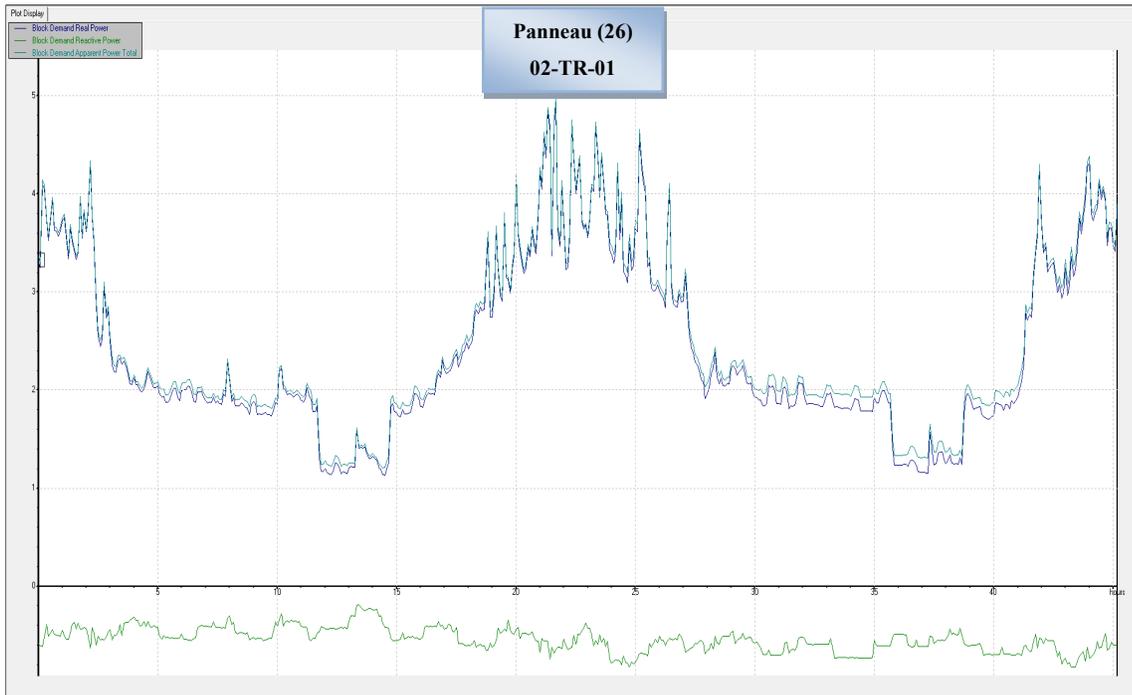


Figure 3.165 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (26)-TRANSFO 02-TR-01

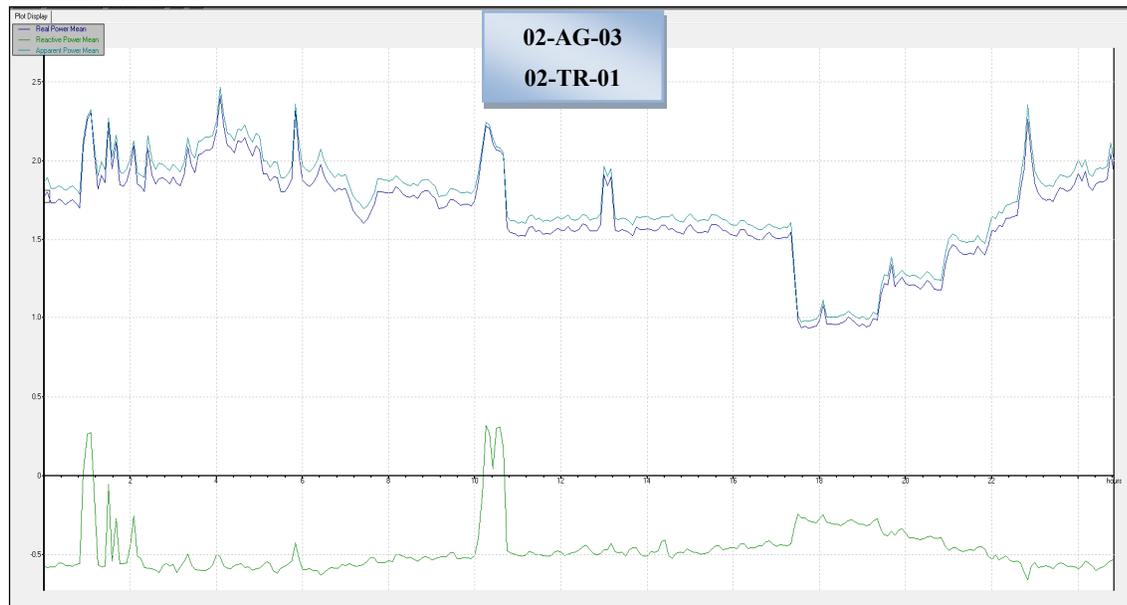


Figure 3.166 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge de l'auge 02-AG-03-TRANSFO 02-TR-01

Le quatrième transformateur dont nous avons mesuré la charge en temps réel est le transformateur 03-TR-01. Ce dernier a un couplage de type étoile/triangle, donc possède une seule sortie pas comme les deux transformateurs vus précédemment dont le couplage est de type étoile/zigzag. Cette sortie est connectée à l'auget 03-AG-02 qui alimente trois panneaux; les panneaux (31), (32) et (33).

Nous pouvons voir le transformateur 03-TR-01 ainsi que les panneaux alimentés par celui-ci dans figure suivante :

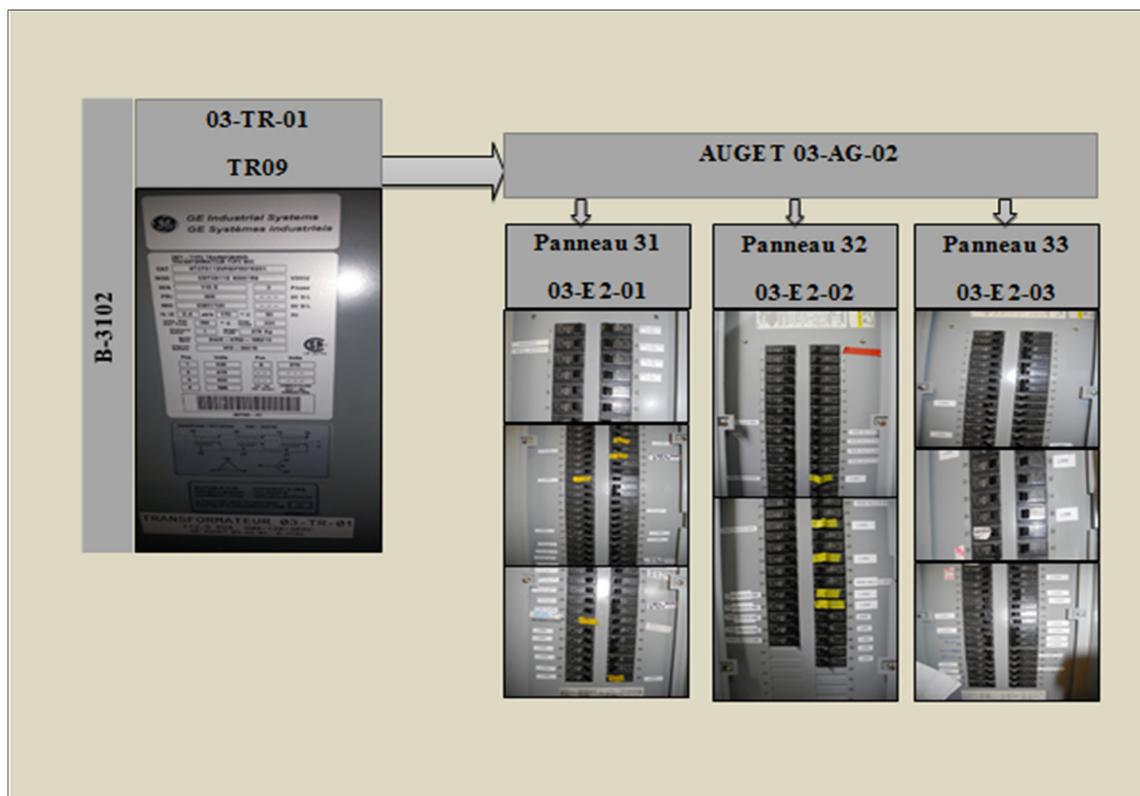


Figure 3.167 Charge alimentée par le transformateur 03-TR-01

Les trois panneaux connectés à l'auget 03-AG-02 alimentent des prises de service dans le corridor et les toilettes près des locaux B-3216 et B-3218, des prises du côté sud, nord, est et ouest du gym dans B-3302, des tableaux dans le gym 1 et 2 dans B-3302, des paniers du côté

est, ouest, sud 1 et sud 2 du gym dans B-3302, des prises pour équipement du gym côté ouest, nord et centre dans B-3302 et des paniers palestres côté ouest et est du B-3306. Ils alimentent de même des prises pour des fers à repasser et sèches à cheveux dans les toilettes pour femmes, des prises dans les toilettes pour hommes, des prises du plancher du local B-3210, des prises pour locaux B-3404, B-3406, B-3408 et B-3410 et pour finir un serveur mains dont le local est non indiqué.

Pour avoir la charge totale de ce transformateur, nous avons mesuré les trois panneaux. Dans ce qui suit, nous présentons en temps réel les formes d'onde des courants et tensions, leurs taux de distorsion harmonique et les profils des puissances actives réactives et apparentes pour chaque panneau alimenté par le transformateur 03-TR-01.

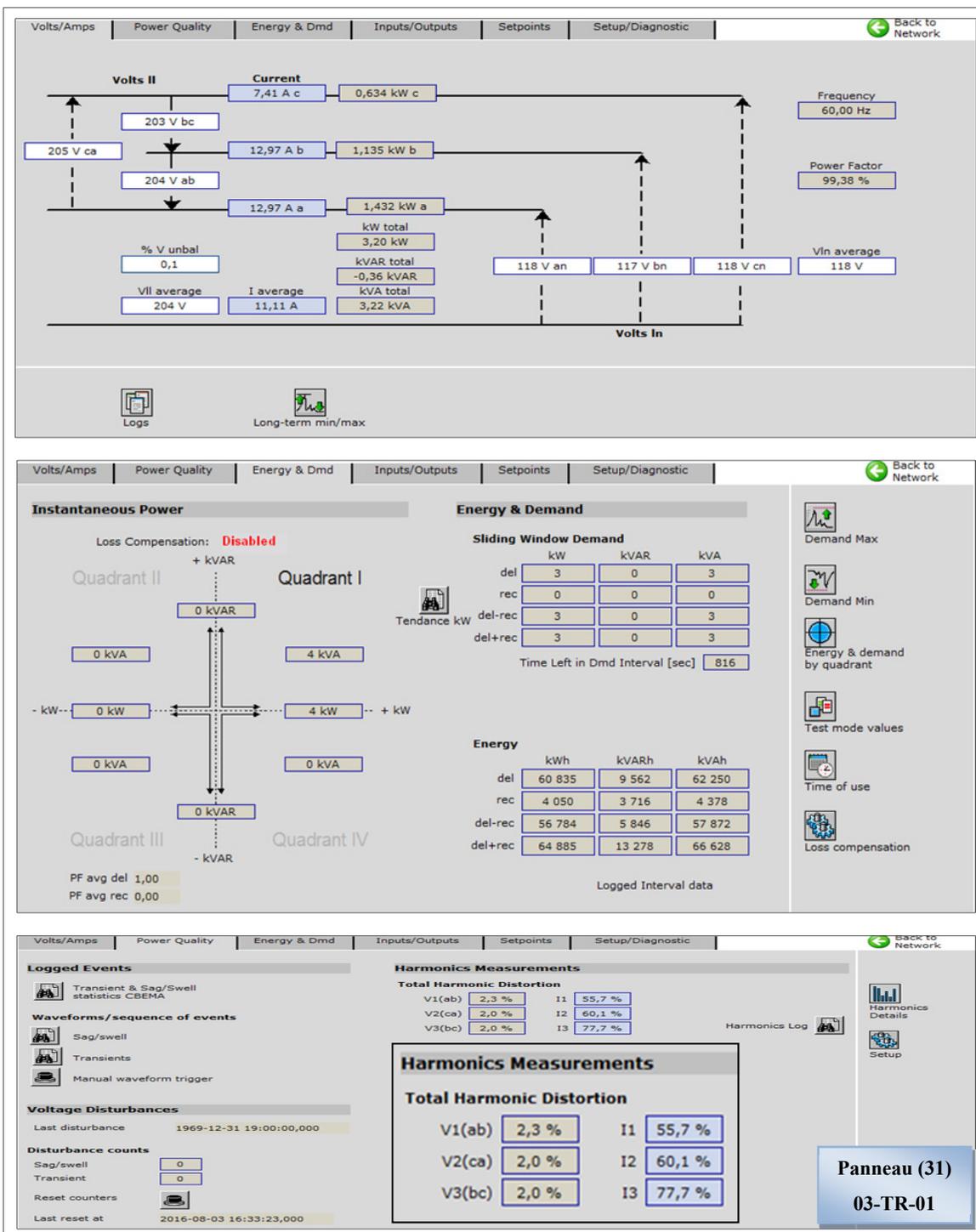


Figure 3.168 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (31)-TRANSFO 03-TR-01

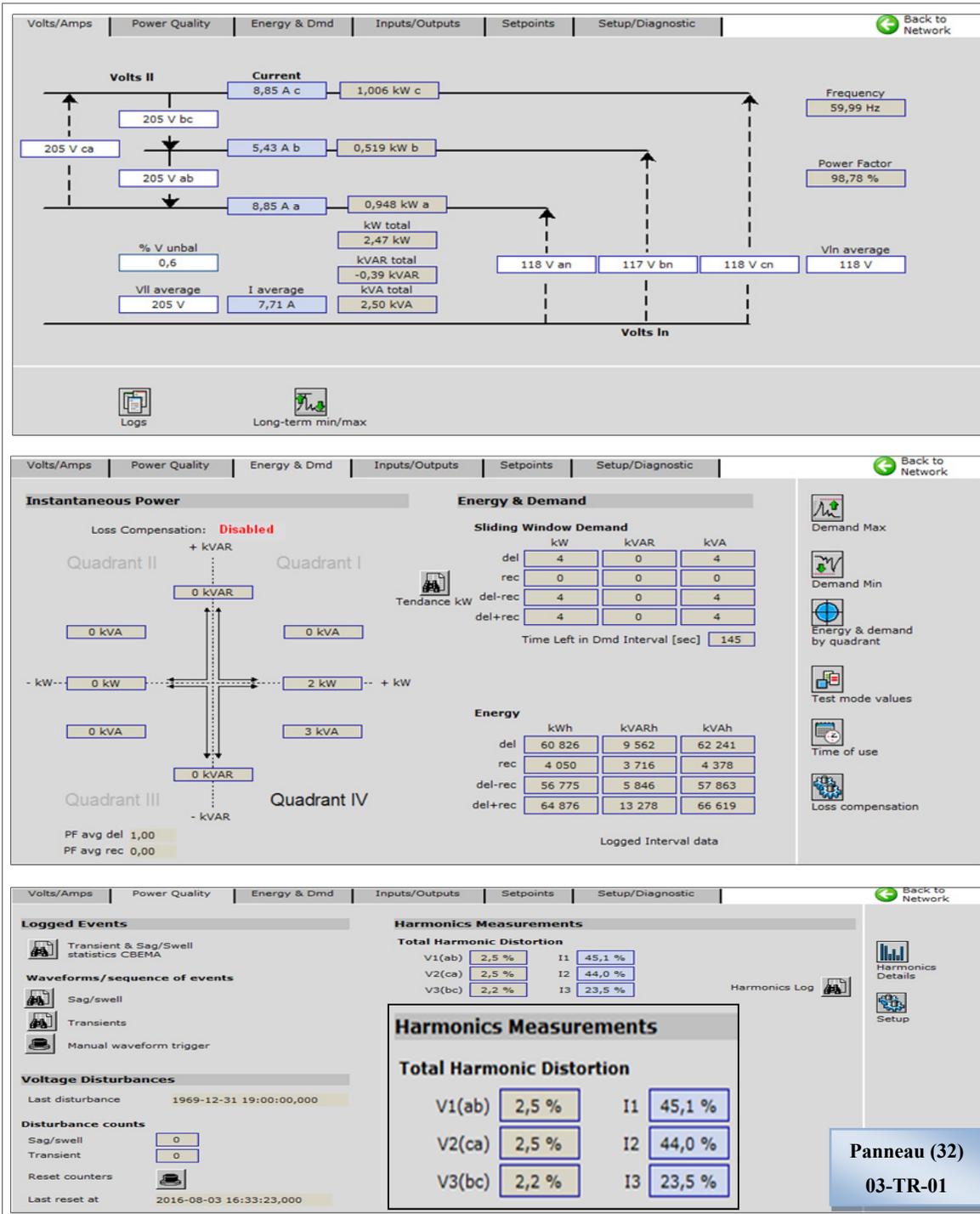


Figure 3.169 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (32)-TRANSFO 03-TR-01

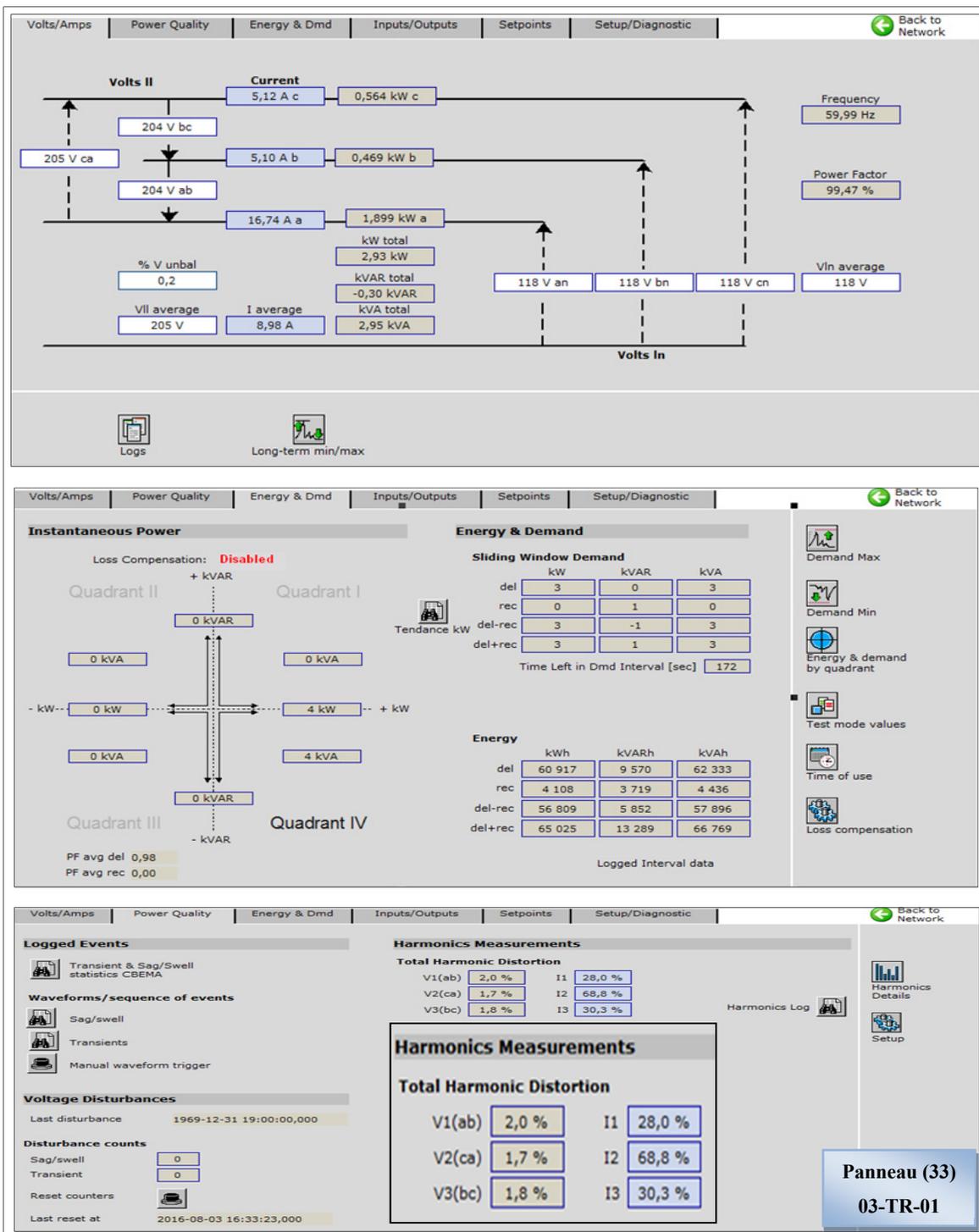


Figure 3.170 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau (33)-TRANSFO 03-TR-01

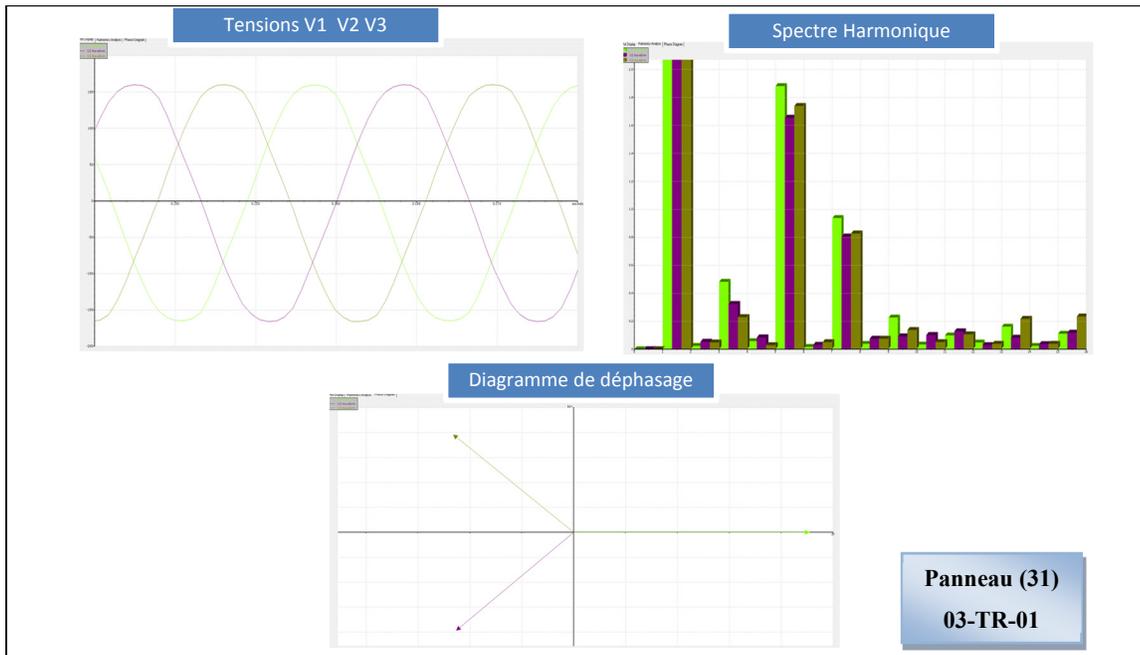


Figure 3.171 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (31)-TRANSFO 03-TR-01

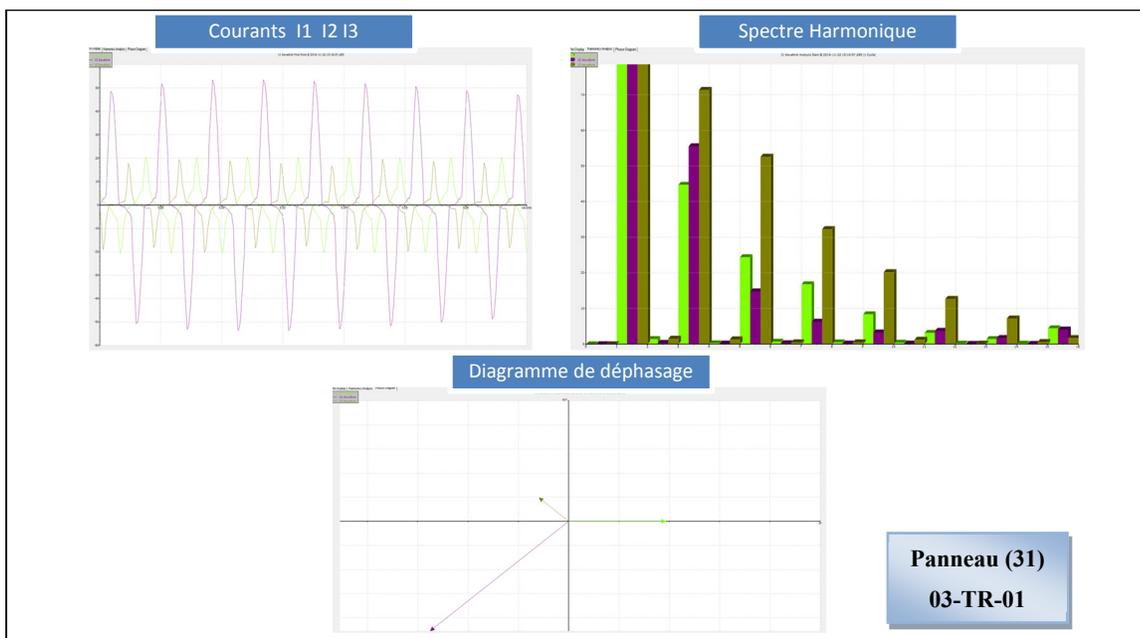


Figure 3.172 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (31)-TRANSFO 03-TR-01

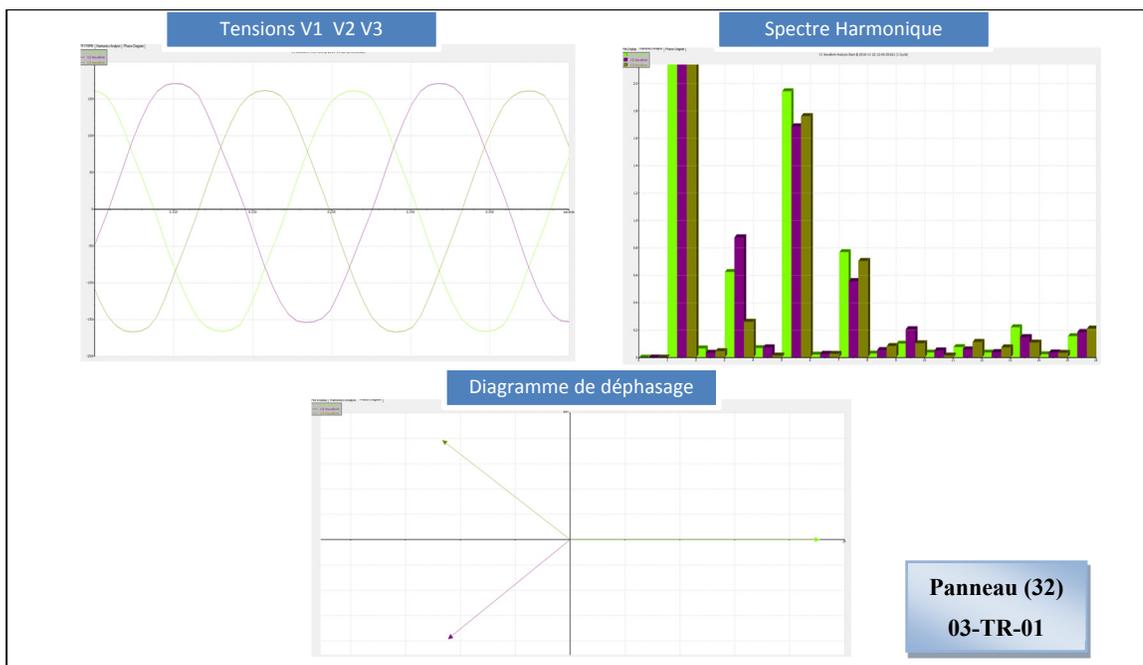


Figure 3.173 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (32)-TRANSFO 03-TR-01

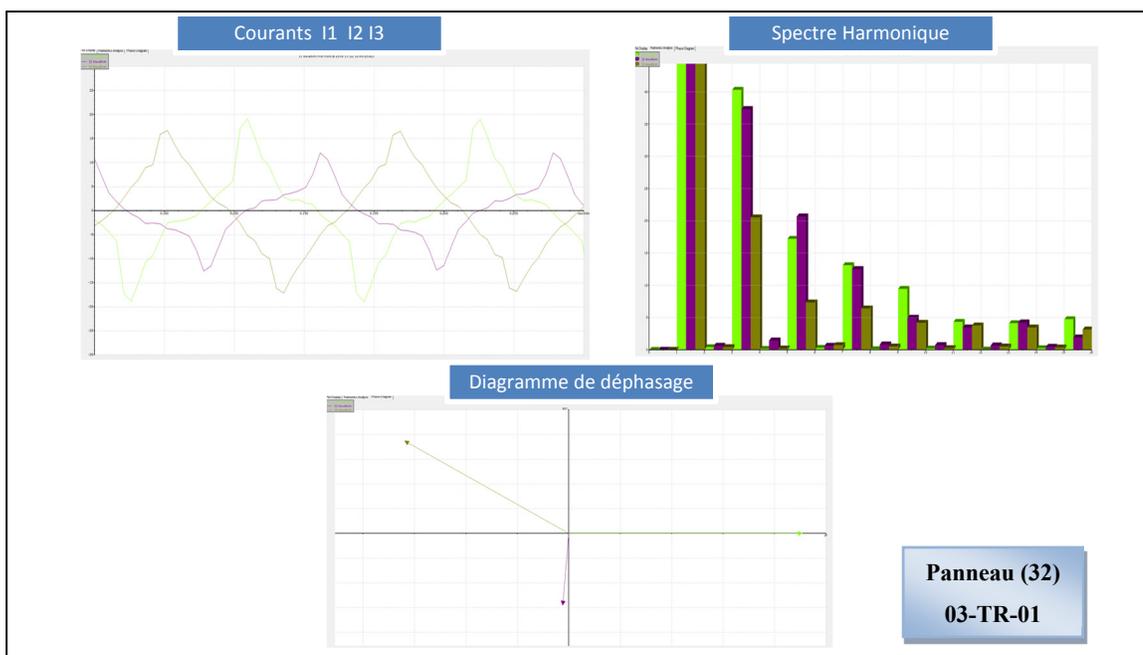


Figure 3.174 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (32)-TRANSFO 03-TR-01

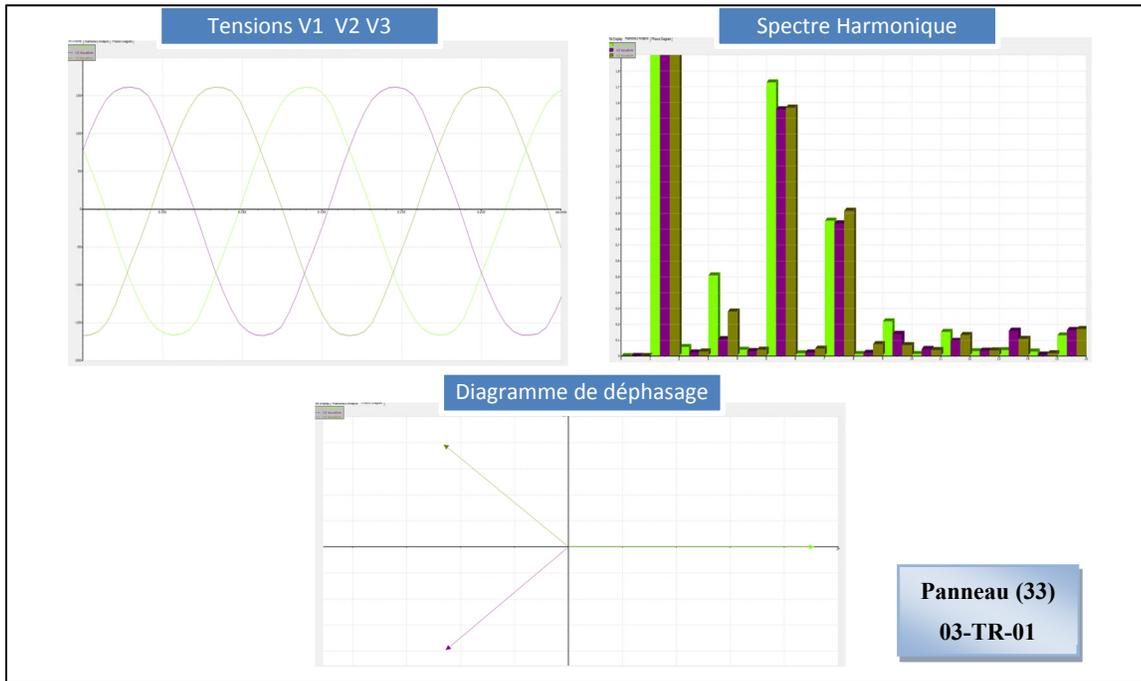


Figure 3.175 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau (33)-TRANSFO 03-TR-01

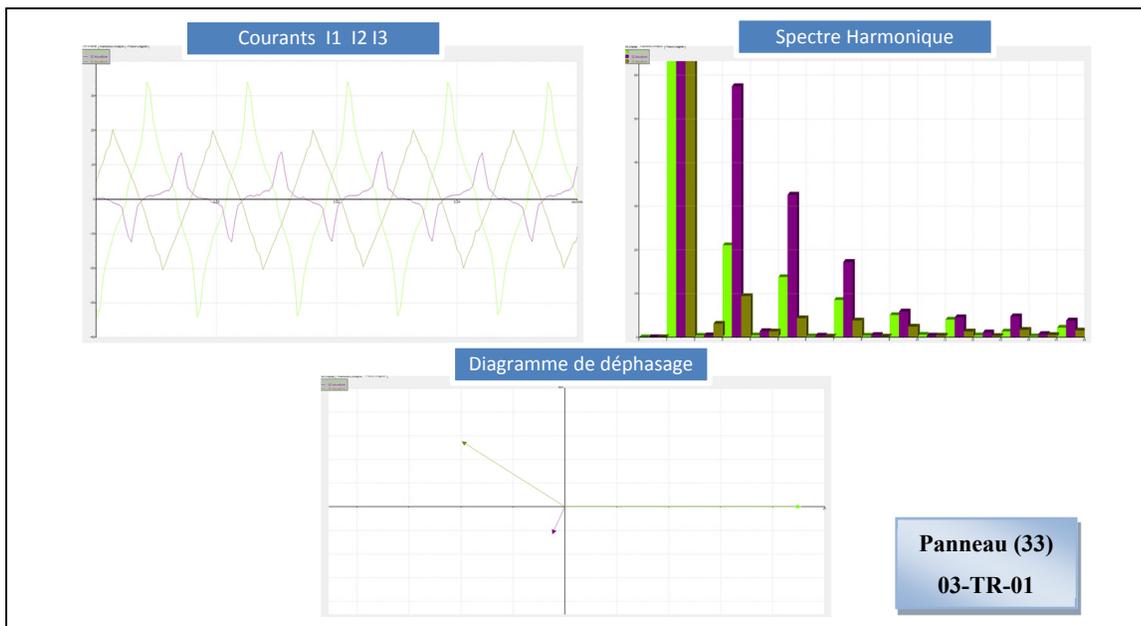


Figure 3.176 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau (33)-TRANSFO 03-TR-01

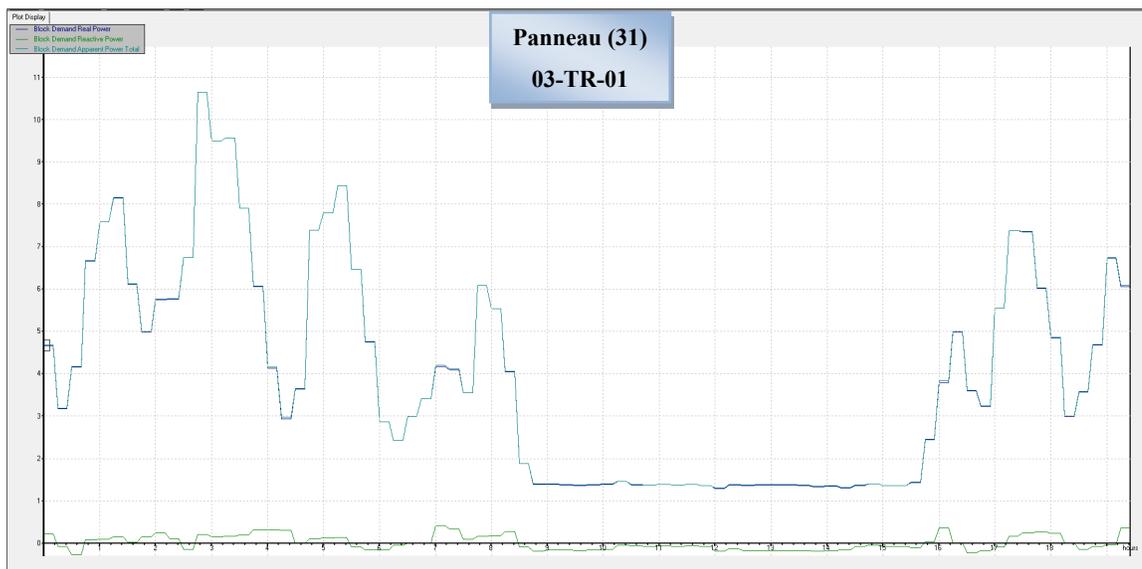


Figure 3.177 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (31)-TRANSFO 03-TR-01

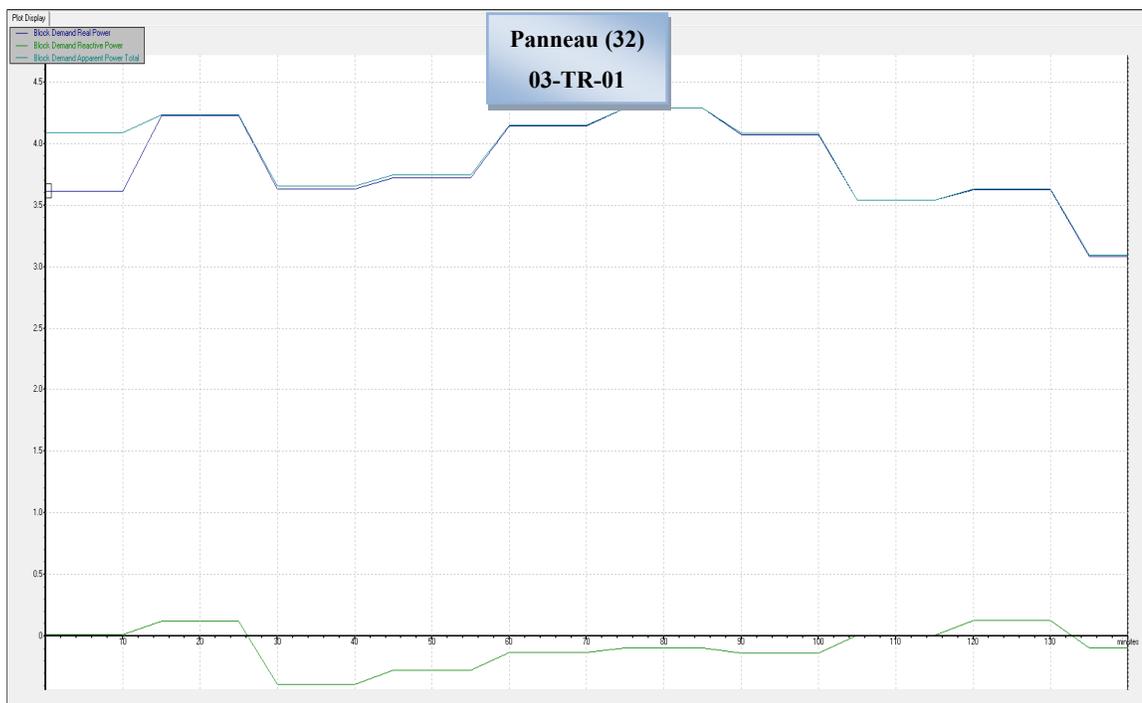


Figure 3.178 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (32)-TRANSFO 03-TR-01



Figure 3.179 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau (33)-TRANSFO 03-TR-01

Pour finir avec les transformateurs de puissances apparentes nominales supérieures ou égales à 100kVA, nous avons désiré mesurer la charge alimentée par le dernier transformateur qui est le transformateur 04-TR-02 surtout qu'il possède une puissance apparente assez importante qui est égale à 375kVA. Cependant, vu que ce transformateur alimente le refroidisseur installé dans la salle B-4602 et que la période où nous avons effectué les mesures est la période automne-hiver, le transformateur 04-TR-02 ne fonctionnait pas à ce temps-là. Donc, nous n'étions pas capables de mesurer la charge en temps réel de ce refroidisseur.

Par contre pour avoir une idée bien précise sur le transformateur 04-TR-02 et le refroidisseur qu'il alimente, nous présentons dans la figure 3.180 les plaques signalétiques du transformateur et du refroidisseur.

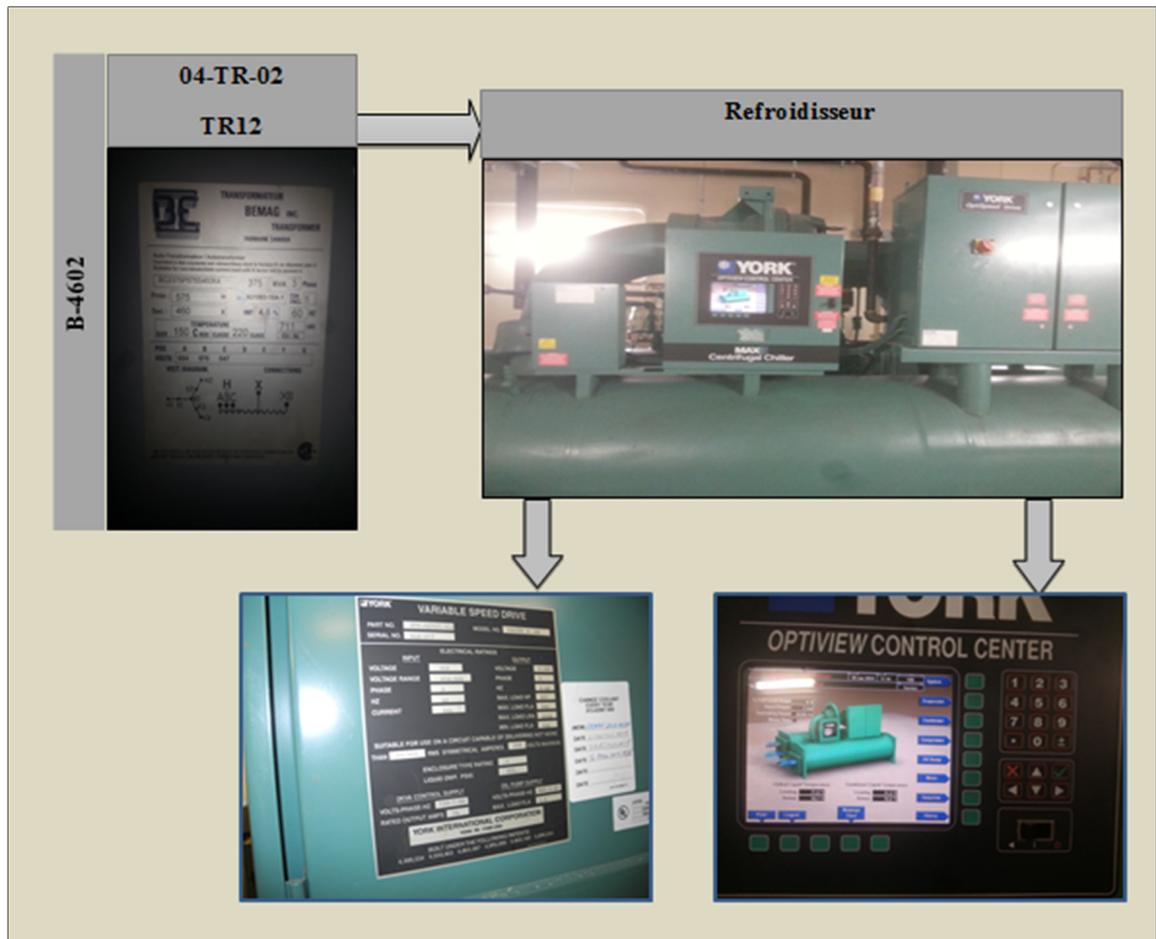


Figure 3.180 Charge alimentée par le transformateur 04-TR-02

Après avoir terminé avec les mesures du pavillon B, nous continuons ces mesures dans le pavillon E avec le même principe, c'est à dire nous nous intéressons à mesurer les charges connectées uniquement aux transformateurs possédant des puissances apparentes supérieures ou égales à 100kVA.

Le paragraphe suivant présentera tous les résultats obtenus pour ces transformateurs de grandes puissances installés dans le pavillon E ou Maison des étudiants.

3.1.4 Mesure en temps réel de la charge totale du Pavillon E ; Maison des étudiants

Le pavillon E, appelé aussi la maison des étudiants est le bâtiment le plus récent qui a été construit et fait partie dorénavant du campus de l'ETS.

Nous avons présenté au début du chapitre 3 la liste complète de tous les transformateurs installés dans ce pavillon tout en précisant les caractéristiques de leurs plaques signalétiques. Par contre, dans ce paragraphe nous allons nous intéresser uniquement aux transformateurs possédant une puissance apparente qui est supérieure ou égale à 100kVA, et nous allons présenter par la suite les résultats que nous avons obtenus après avoir mesuré la charge réelle de chaque transformateur.

Le tableau 3.4 présente la liste des transformateurs dont la puissance apparente est supérieure ou égale à 100kVA et dont nous avons mesuré la charge en temps réel.

Tableau 3.4 Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le pavillon E ; Maison des étudiants

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	Couplage
PAVILLON E - MAISON DES ÉTUDIANTS									
E. S2-013	TR-SS2-2	DXJ-0363-219658	C8CT0225VH0316000202	CD3C0225VHA6XXBB	5,88%	225	600	208Y/120	D/y
	TRANSFO CHILLER 1	371-614 ENCL1		MT300A18	4%	300	600	460Y/266	D/y
	TRANSFO CHILLER 2	372-614 ENCL1		MT300A18	4%	300	600	460Y/266	D/y
6-001	TR-A-1	DXH-0857-219658	C8CT0150VH0316000202	CD3C02150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y

Comme nous pouvons le voir, nous avons quatre transformateurs de puissance apparente supérieure ou égale à 100kVA. Ainsi, nous avons commencé par mesurer la charge du transformateur TR-SS2-2 installé au sous-sol 2 du pavillon E dans la salle E.S2-013. En effet, ce transformateur qui est de 225kVA, alimente le panneau PR-SS2-1 comme le montre la figure 3.181.

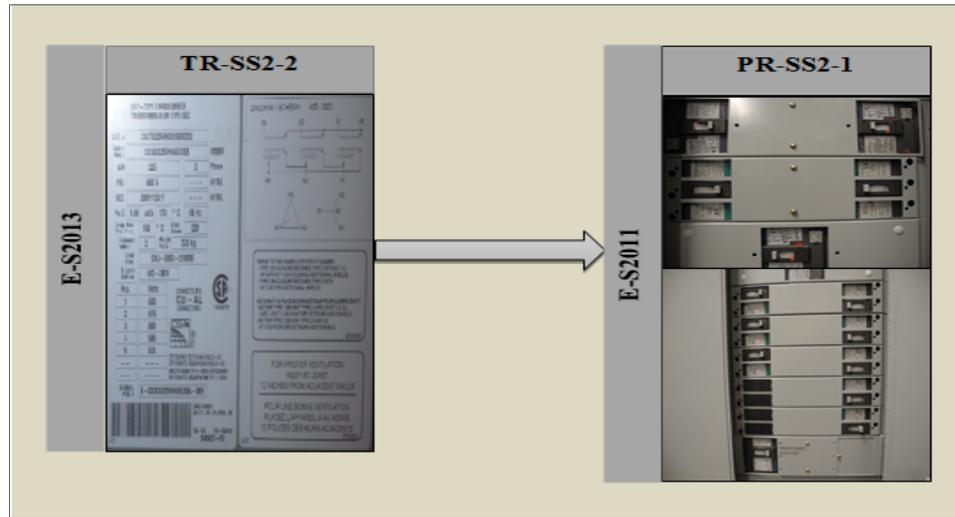


Figure 3.181 Charge alimentée par le transformateur TR-SS2-2

Le panneau PR-SS2-1 alimente des bornes de recharge pour les véhicules électriques au sous-sol SS1 et des panneaux électriques comme PR-1-1, PR-2-1, PR-3-1 et PR-SS2-2. Ce dernier alimente de son côté, le panneau PR-SS2-2 alimente les prises au sous-sol SS2, les prises au sous-sol SS1, les prises du local E.S2-013, E.S2-009 et E.S2-005, les aérothermes AER-1 SS2 et AER-1 SS1. Il alimente aussi des ventilateurs d'évacuation VE-810 dans E.S1-008, VE-807 dans E.S1-014, VE-802 dans E.S1-009, VE-803 dans E.S1-005, VE-804 dans E.S1-010 et VE-802 dans E.S1-009 et un ventilateur d'alimentation VA-803. Des prises pour éclairage au niveau des puits et ascenseurs, pour TV aux ascenseurs SS1 et SS2 et pour le cabinet chauffant radiant sont aussi alimentées par le panneau PR-SS2-1. De plus, il assure la retenue des portes de la maison des étudiants et alimente le réservoir eau chaude au sous-sol SS1.

Les formes d'onde des courants et des tensions, leurs taux de distorsion harmonique, leurs spectres harmoniques et l'évolution des puissances actives réactives et apparentes obtenus suite aux mesures effectuées aux bornes de la charge du transformateur TR-SS2-2, sont donnés par les figures 3.182, 3.183, 3.184 et 3.185.

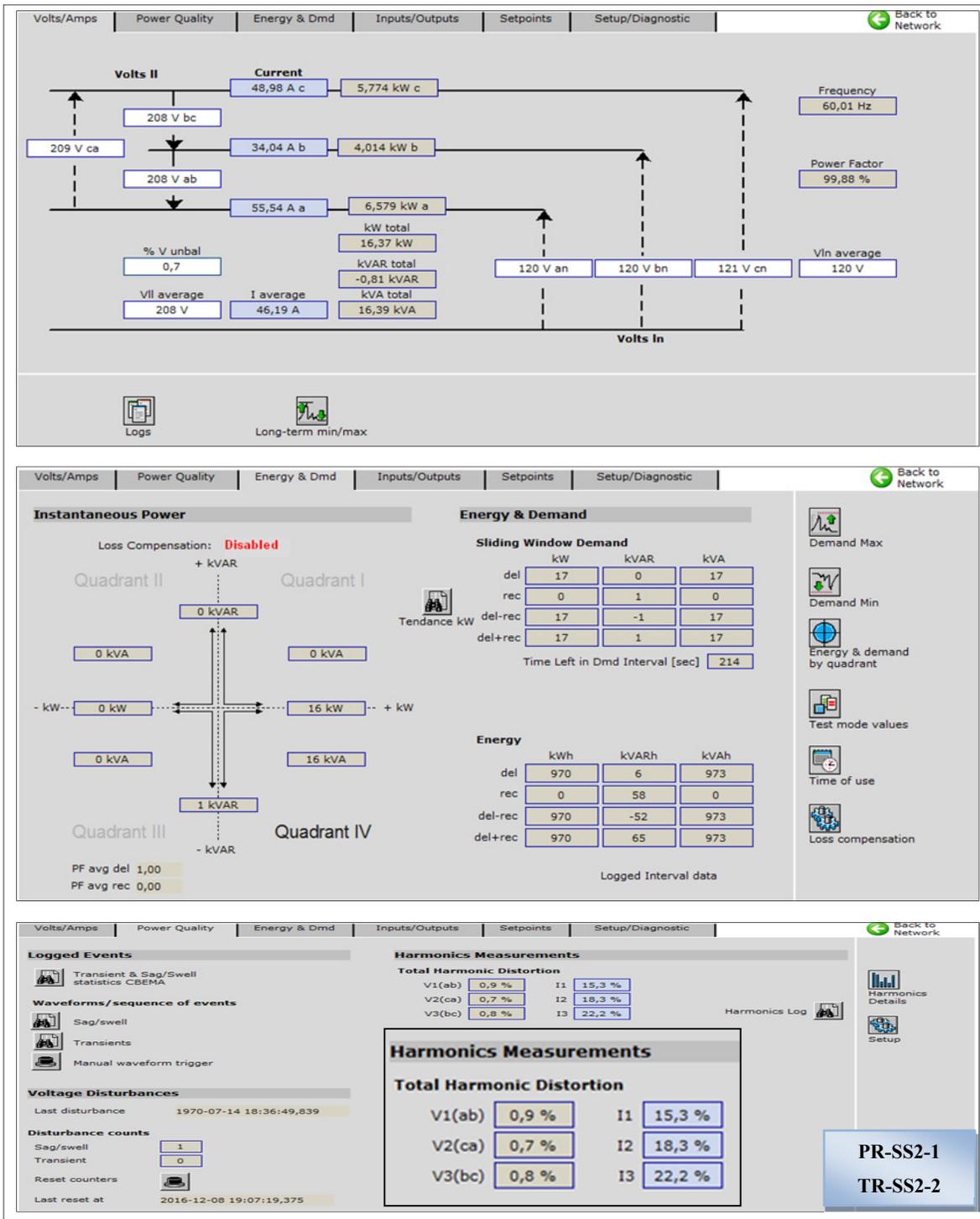


Figure 3.182 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PR-SS2-1-TRANSFO TR-SS2-2

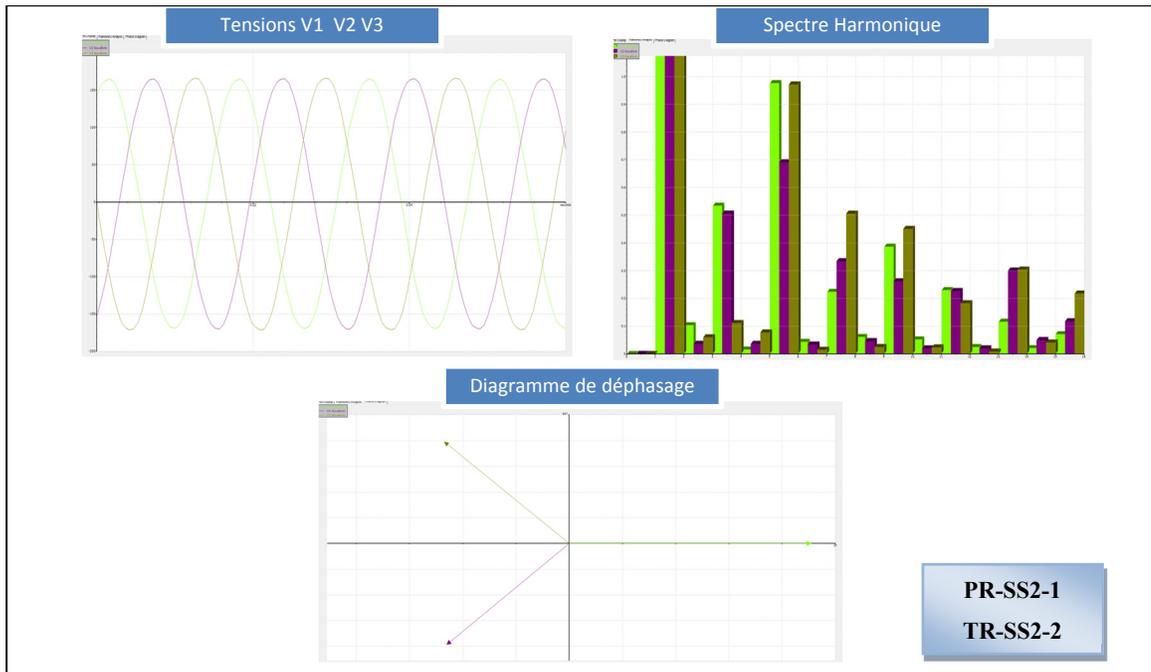


Figure 3.183 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PR-SS2-1 connecté au transformateur TR-SS2-2

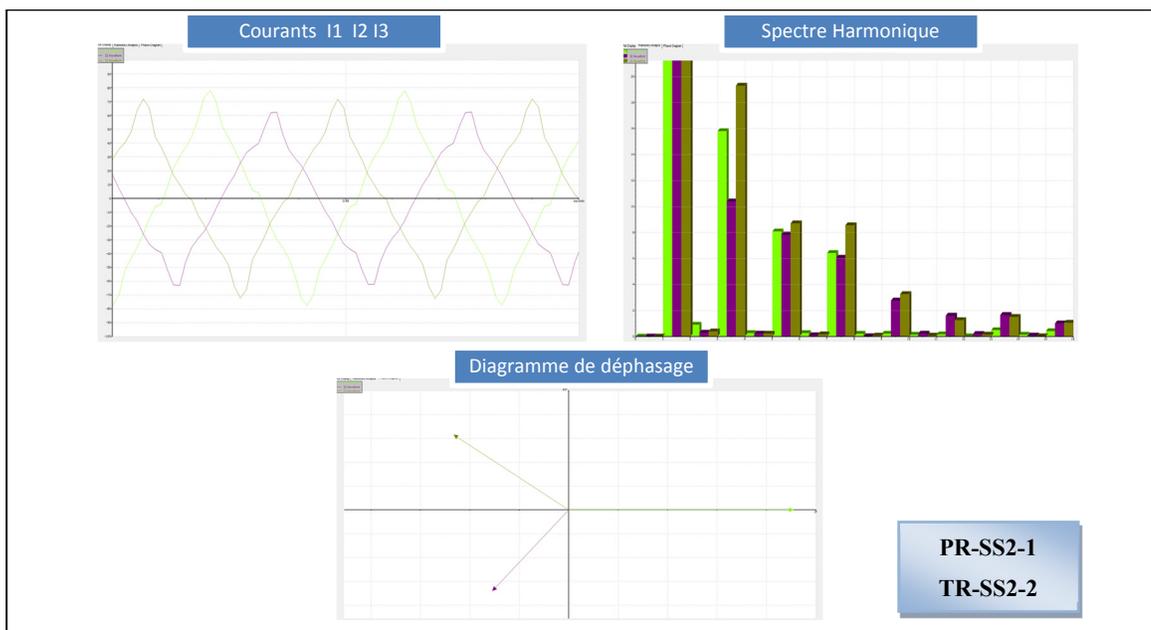


Figure 3.184 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PR-SS2-1 connecté au transformateur TR-SS2-2

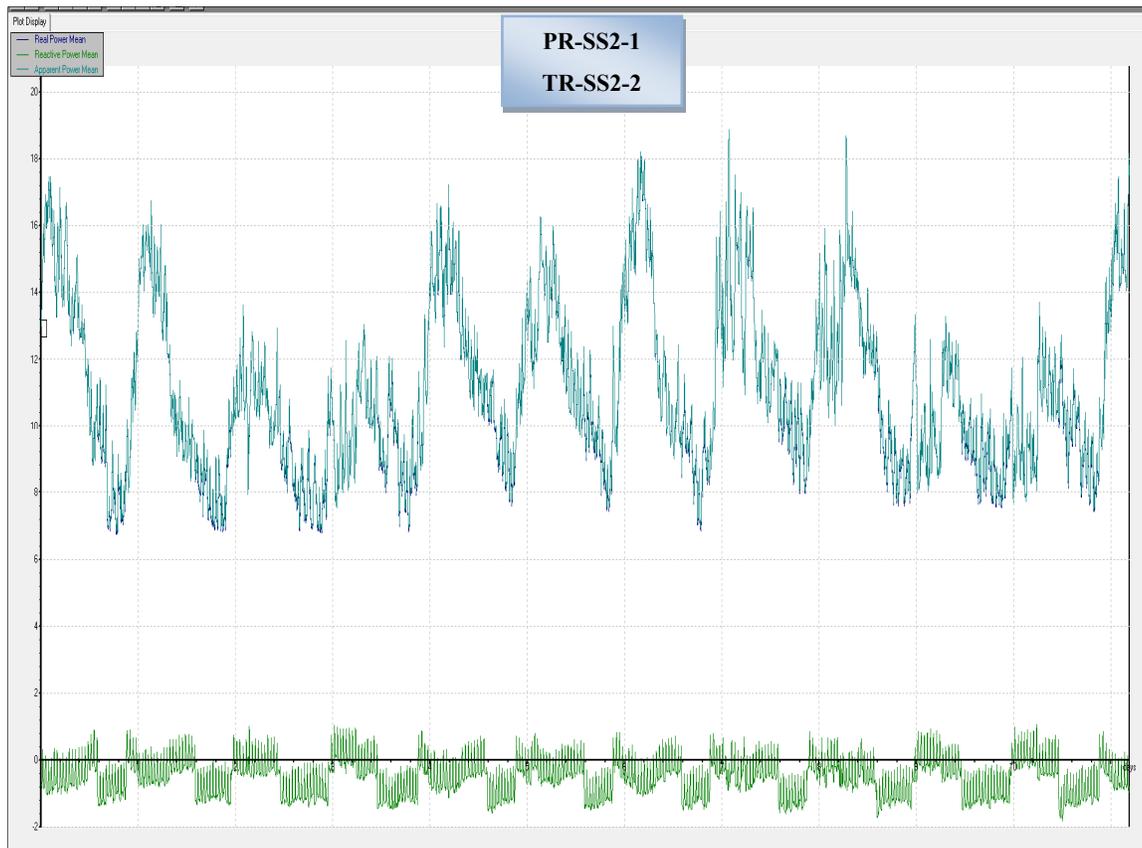


Figure 3.185 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PR-SS2-1-TRANSFO TR-SS2-2

En plus du transformateur TR-SS2-2, nous avons aussi mesuré la charge aux bornes du transformateur TRANSFO CHILLER 2. Ce transformateur possède une puissance apparente assez importante qui est égale à 300kVA ce qui est évident puisqu'il alimente un refroidisseur nommé CHILLER 802 installé au sous-sol 1 dans la salle E.S1009.

Nous pouvons voir sur la figure 3.186 le refroidisseur CHILLER 802 alimenté par le transformateur TRANSFO CHILLER 2.

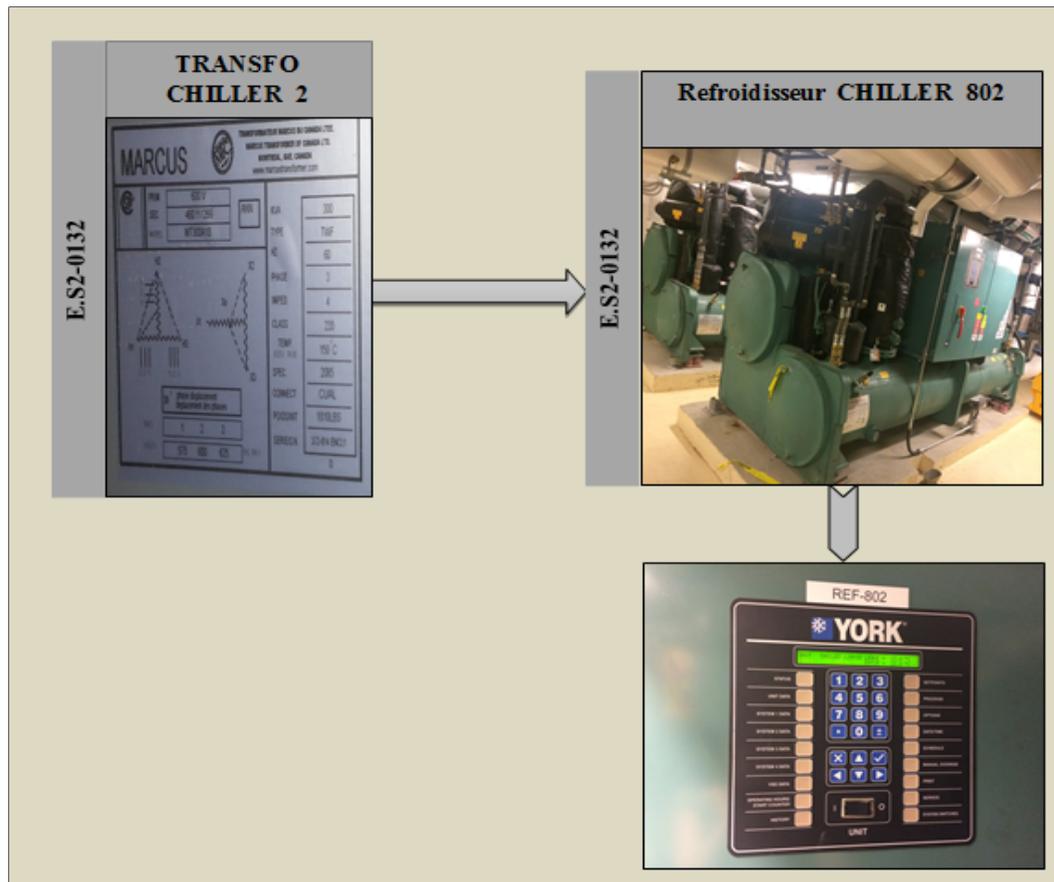


Figure 3.186 Charge alimentée par le transformateur TRANSFO CHILLER 2

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus des mesures effectués aux bornes du refroidisseur CHILLER 802.

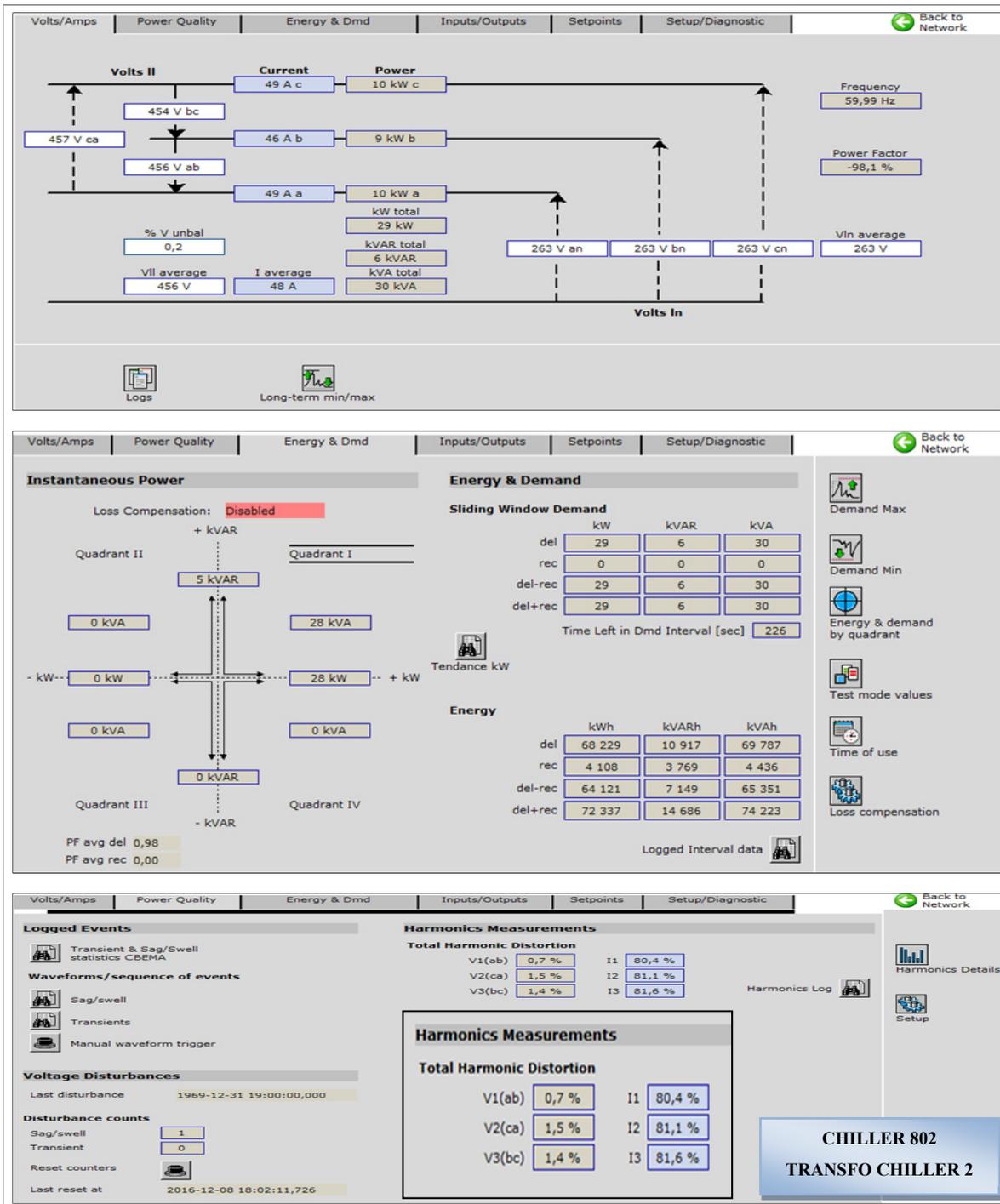


Figure 3.187 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du refroidisseur CHILLER 802-TRANSFO CHILLER 2

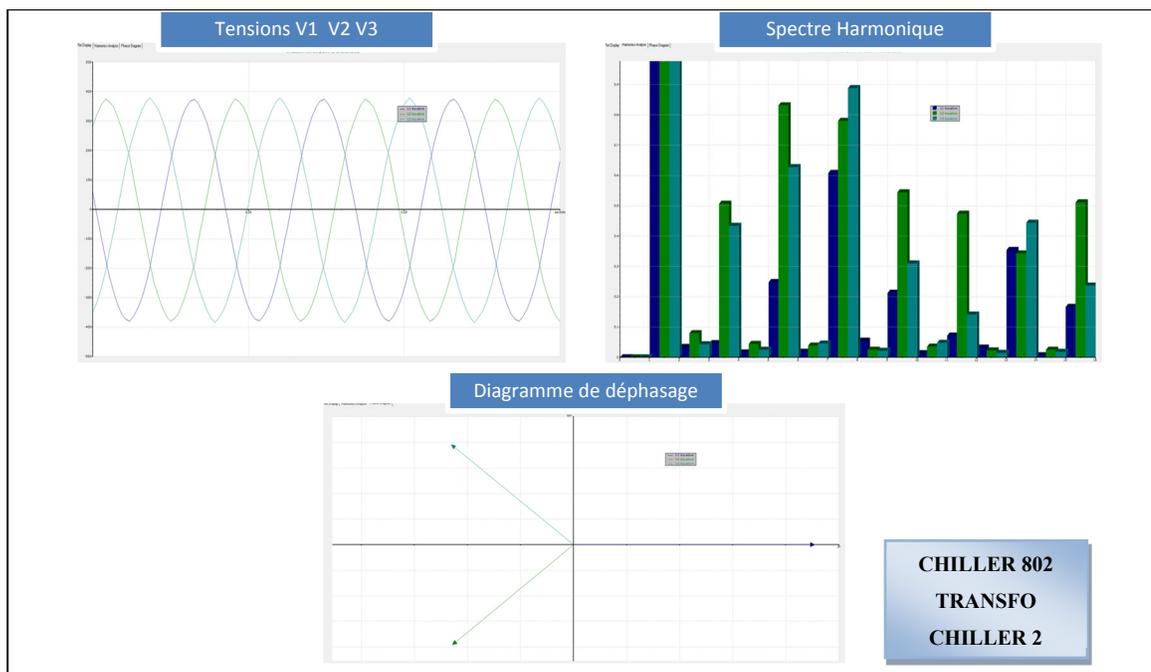


Figure 3.188 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du refroidisseur CHILLER 802-TRANSFO CHILLER 2

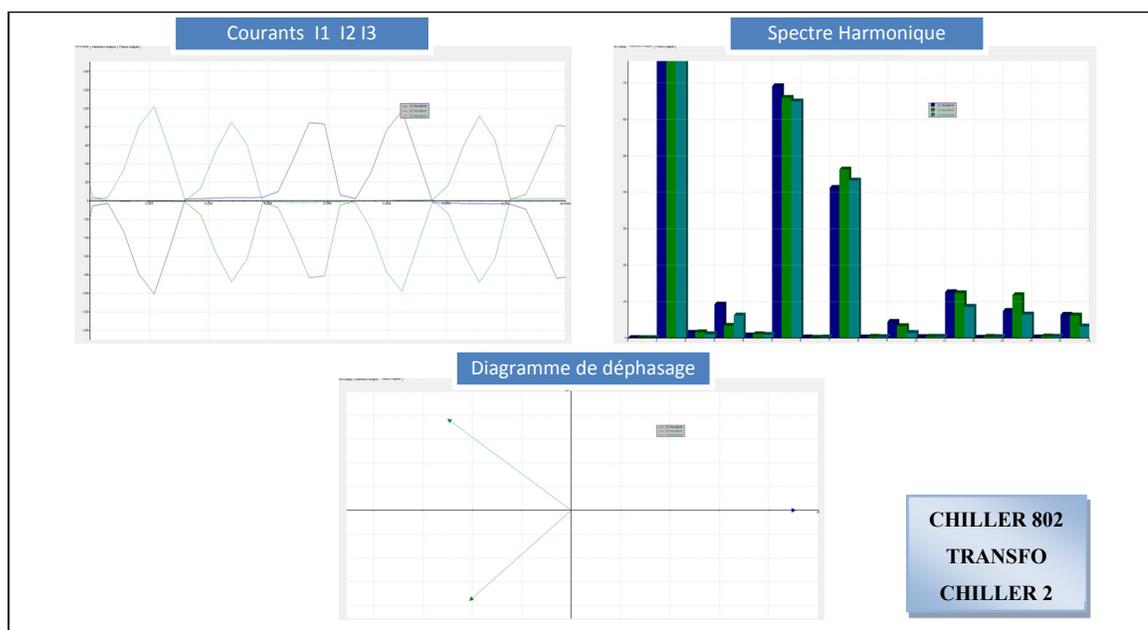


Figure 3.189 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du refroidisseur CHILLER 802-TRANSFO CHILLER 2

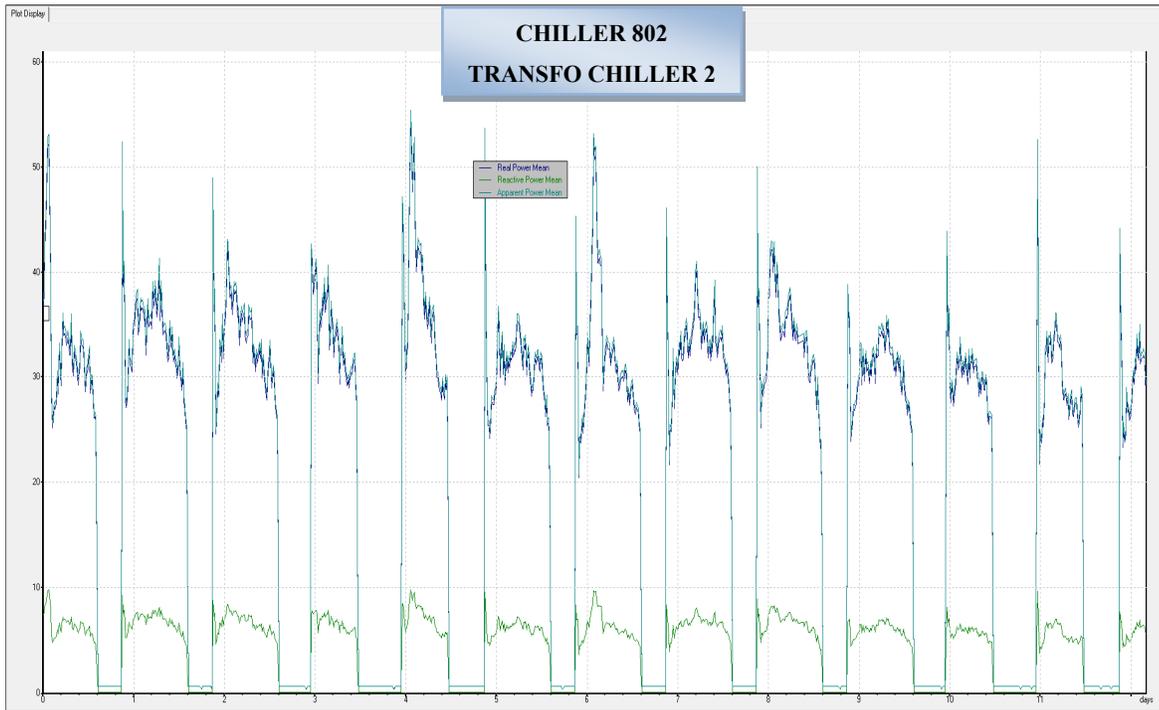


Figure 3.190 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du refroidisseur CHILLER 802-TRANSFO CHILLER 2

Nous avons un deuxième refroidisseur connecté au transformateur TRANSFO CHILLER 1 figurant dans le tableau 3.4 qui est similaire au TRANSFO CHILLER 2. Par contre, le refroidisseur n'était pas en marche quand nous avons pris les mesures, vu que le refroidisseur CHILLER 802 était en marche alors que les deux refroidisseurs ne fonctionnent pas simultanément ; si l'un est en marche l'autre est en repos.

Cependant, nous avons pris des photos du transformateur TRANSFO CHILLER 1 ainsi que le refroidisseur alimenté par celui-ci, ces photos sont données par la figure 3.191.

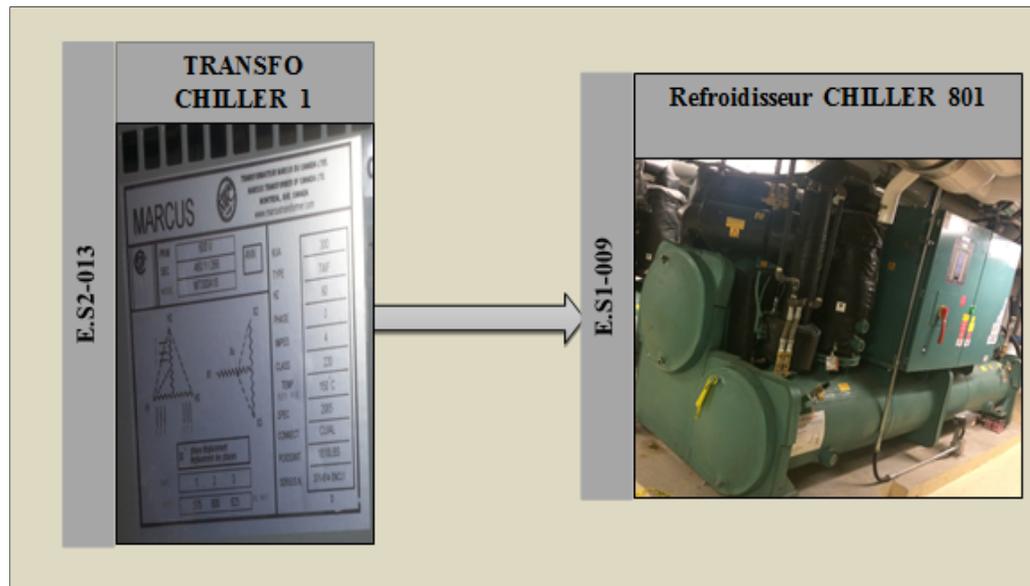


Figure 3.191 Charge alimentée par le transformateur TRANSFO CHILLER 1

Pour finir avec le pavillon E, nous avons mesuré le transformateur installé au 6^{ème} étage dans la salle E.6-001 ; il s'agit du transformateur TR-A-1 qui alimente le panneau PR-A-1 (1). Ce dernier alimente plusieurs charges parmi lesquelles nous pouvons mentionner : des prises pour l'éclairage des puits, des ascenseurs #6-003, des prises des locaux E.6-001, E.6-002 et E.6-003, des prises pour les cabines des ascenseurs ASC.01, ASC.02, ASC.03 et ASC.04.

Ils alimentent en plus deux adoucisseurs AS-1 et AD-2 dans E.6-001, une pompe de surpression PSPG-801, un aérotherme AER #6-001, un ventilateur d'alimentation, un compresseur, un chauffe-compresseur, deux ventilateurs d'évacuation VE-APP-1 dans E.6-001 et VE-APP-816, deux unités de transfert d'air UTA-802 et UTA-804, deux panneaux PR-4-1 et PR-5-1, un sécheur et des pompes de filtration pour les tours d'eau.

Nous pouvons voir ce panneau PR-A-1 (1) ainsi que quelques charges parmi celle que nous avons mentionné ci-dessus dans la figure 3.192.

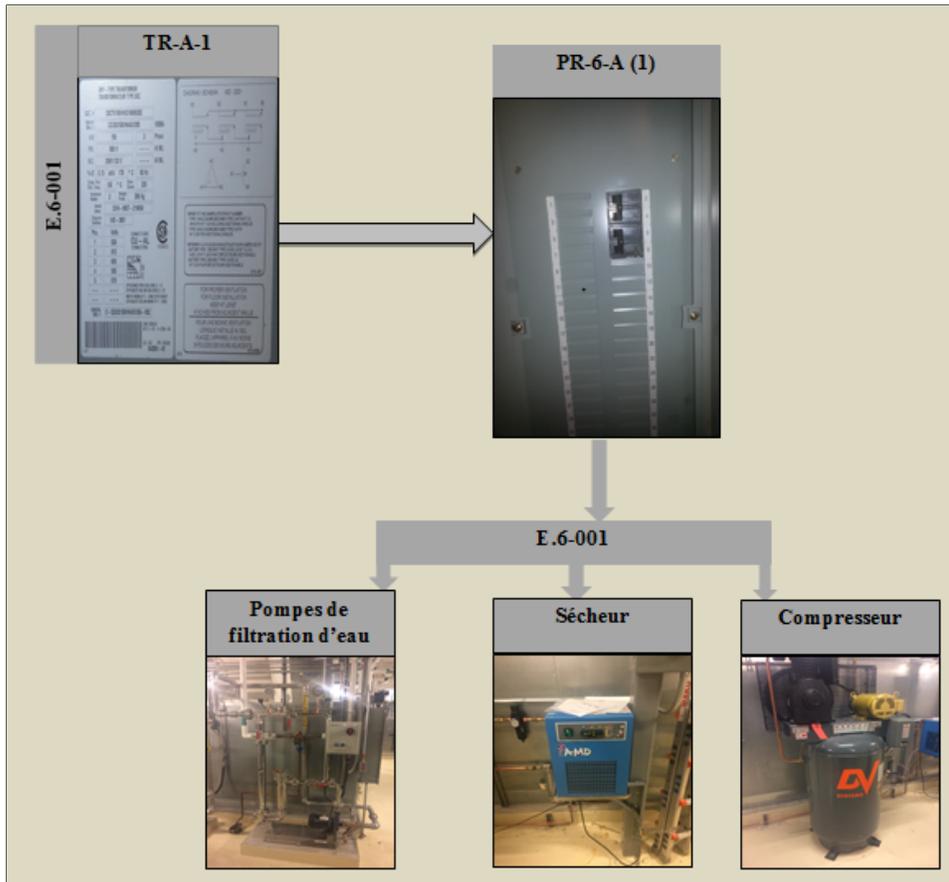


Figure 3.192 Charge alimentée par le transformateur TR-A-1

Les figures 3.193, 3.194, 3.195 et 3.196 montrent les résultats expérimentaux résultats des mesures réalisées au niveau du panneau PR-A-1 (1). Il est important de mentionner qu'il faut multiplier par le facteur deux les résultats des mesures de courants et puissance vu que nous avons pu mesurer qu'un seul câble par phase tandis qu'il y a deux câbles par phase entrants vers le panneau PR-A-1 (1).

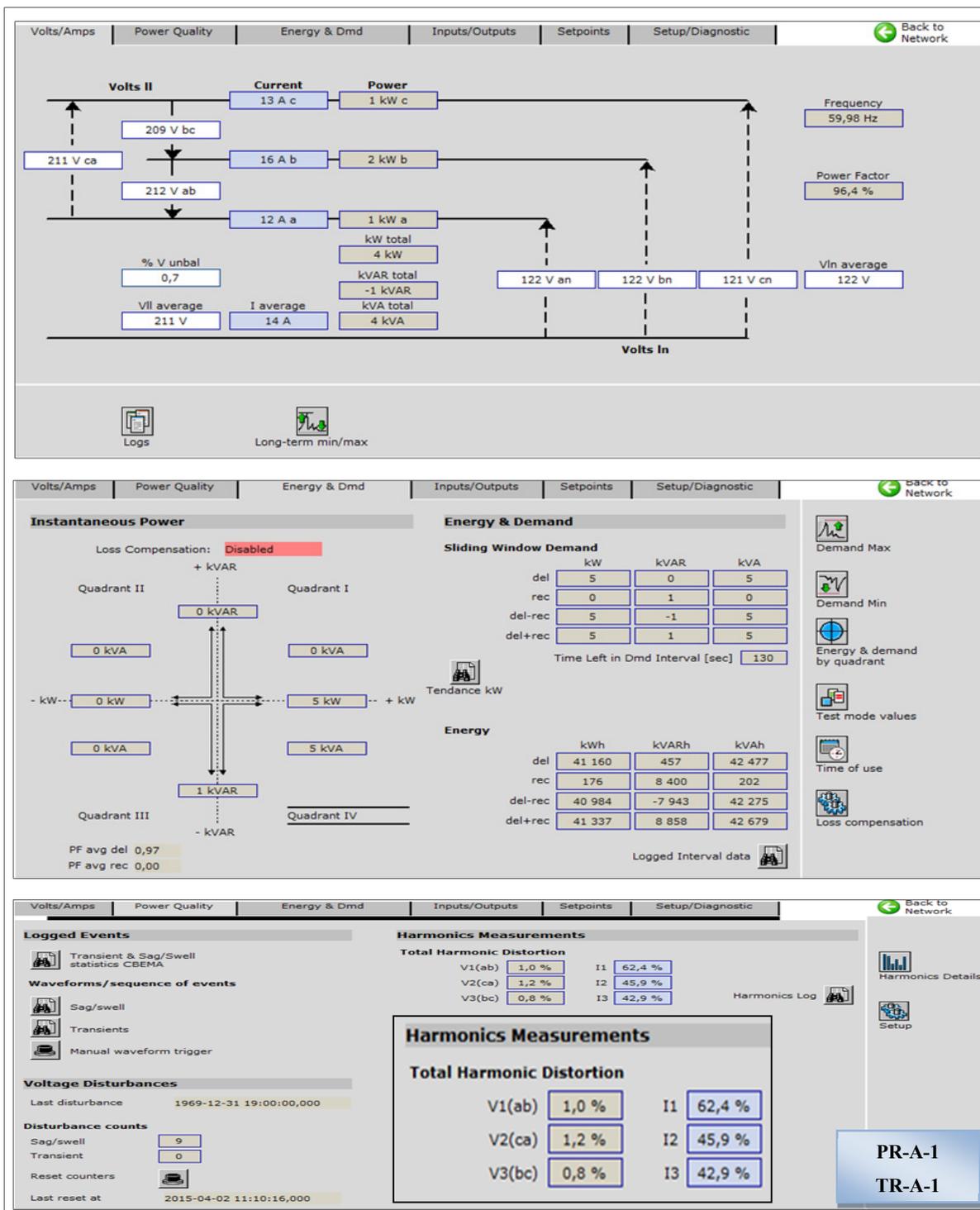


Figure 3.193 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PR-A-1 (1) -TRANSFO TR-A-1

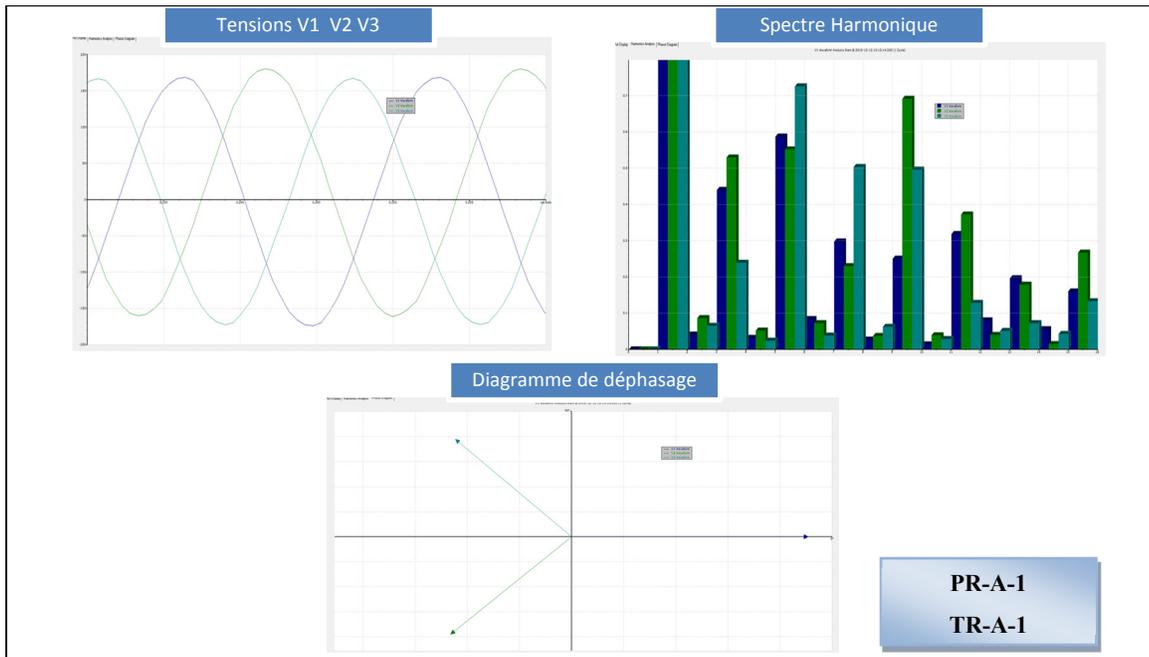


Figure 3.194 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PR-A-1 (1) connecté au transformateur TR-A-1

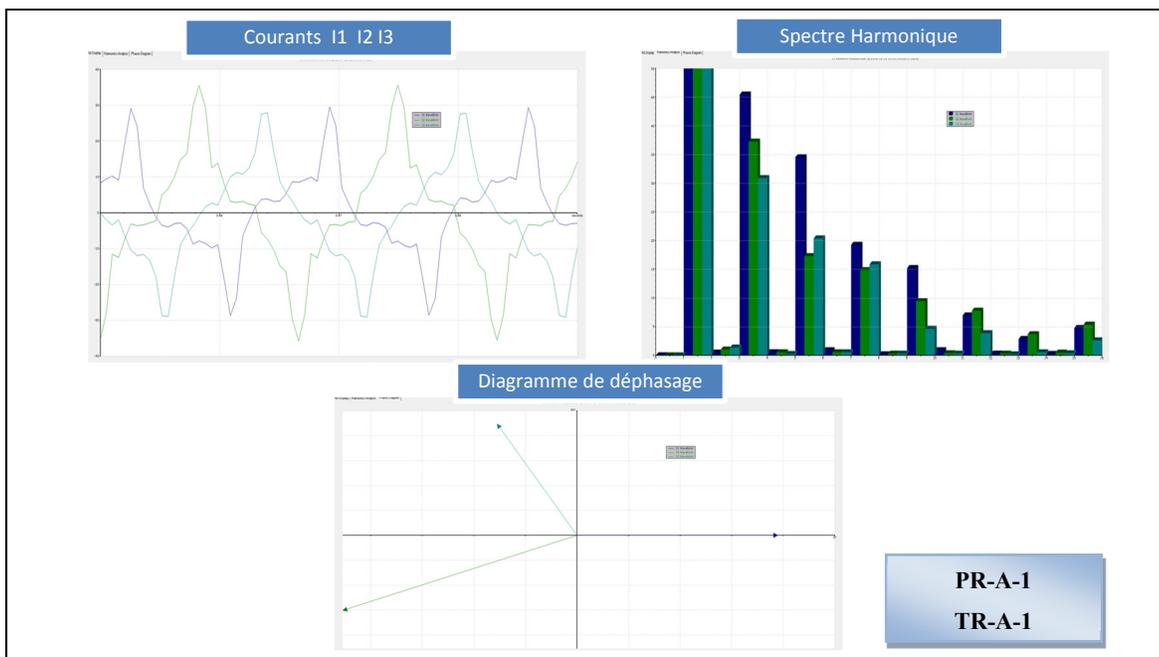


Figure 3.195 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PR-A-1 (1) connecté au transformateur TR-A-1

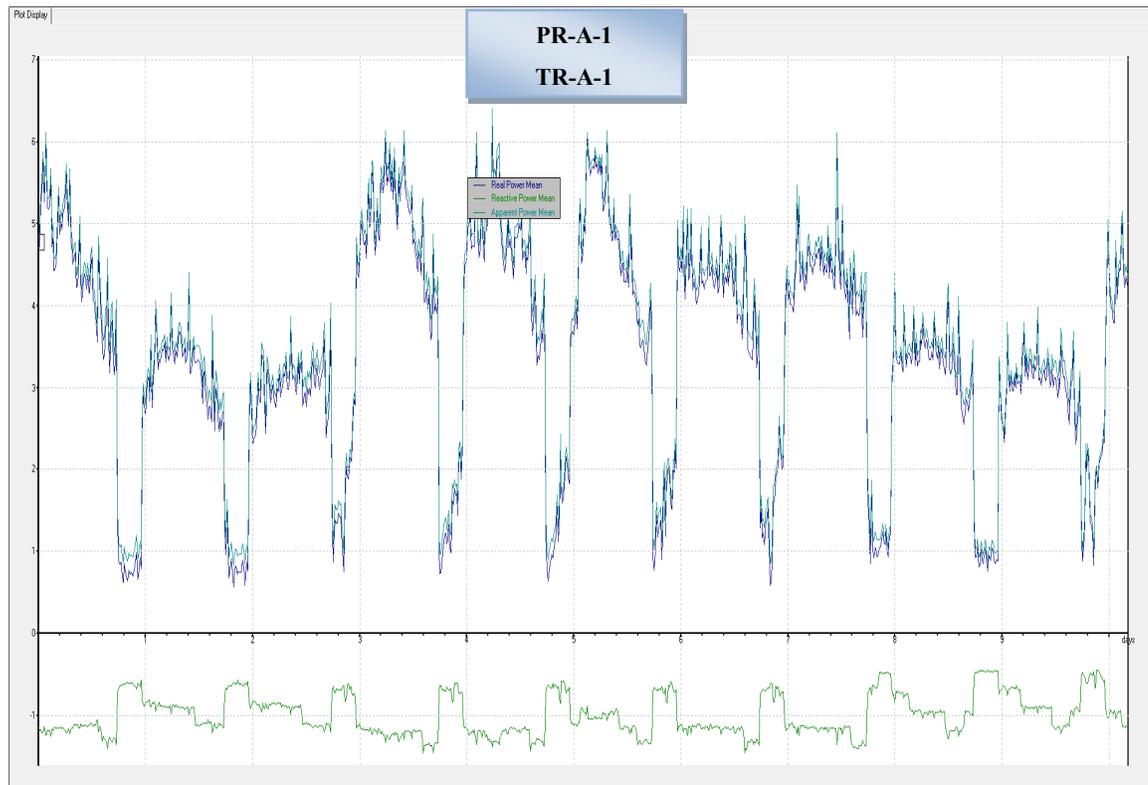


Figure 3.196 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PR-A-1 (1)-TRANSFO TR-A-1

Après avoir effectué des mesures en temps réel au niveau de la charge de chaque transformateur installé dans le pavillon E et dont la puissance apparente nominale est supérieure ou égale à 100kVA, nous nous sommes passé au marché Metro afin d'effectuer les mêmes mesures au niveau des transformateurs qui l'alimentent.

3.1.5 Mesure en temps réel de la charge totale du marché METRO

Le marché Metro fait partie du campus universitaire, il est localisé dans le bâtiment de la résidence PH3. Pour mesurer sa consommation en temps réel, nous nous sommes dirigés vers le niveau du parking du marché METRO qui se trouve au sous-sol 1 du bâtiment de la résidence PH3.

Afin de fournir de l'énergie électrique nécessaire pour le marché METRO, quatre transformateurs ont été installés dans la salle électrique du sous-sol 1. Parmi ces quatre transformateurs, il y a deux qui possèdent une puissance apparente nominale supérieure ou égale à 100kVA. Ces transformateurs ainsi que les caractéristiques de leurs plaques signalétiques sont donnés par le tableau 3.5.

Tableau 3.5 Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ alimentant le marché Metro

Local	TRANSFO	No. de série	No. de catalogue	Modèle	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
MARCHÉ METRO									
SS1 Metro	MA-TR-0102	DRB-0404-177220	C8CT0225VH0316000202	CD3C0225VHA6XXBB	5,88%	225	600	208Y/120	D/y
	MA-TR-0101	DRB-0411-177220	C8CT0300VH0316000202	CD3C0300VHA6XXBB	5,53%	300	600	208Y/120	D/y

Tel que le travail qui était fait pour les bâtiments vus précédemment, pour mesurer la charge en temps réel pour chaque transformateur, nous nous sommes intéressés uniquement aux deux transformateurs de puissances apparentes 225kVA et 300kVA listés dans le tableau ci-dessus.

Dans la suite de ce paragraphe, nous présenterons d'un côté les formes d'ondes des courants et tensions ainsi que leurs taux de distorsion harmonique THD et leurs spectres harmoniques, et d'un autre côté l'évolution des puissances actives, réactives et apparentes obtenus en temps réel, et ce, au niveau de la charge de chaque transformateur.

Nous avons entamé nos mesures avec le transformateur MA-TR-0101. La figure 3.197 présente le transformateur MA-TR-0101 et le panneau qu'il alimente.

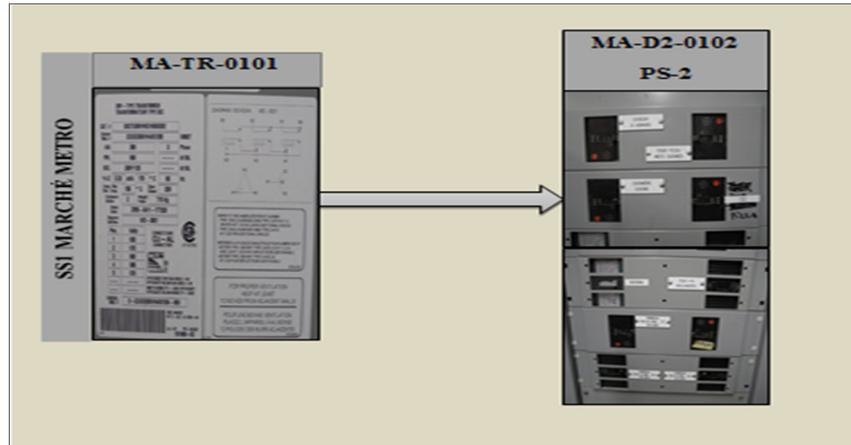


Figure 3.197 Charge alimentée par le transformateur MA-TR-0101

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.196, le transformateur MA-TR-0101 alimente le panneau MA-D2-0102. Ce panneau alimente plusieurs charges installées dans le marché METRO. Parmi ces charges nous mentionnons le cuiseur à homard, les fours à pizza, la cuisine ainsi que la cuisinière, la friteuse, le four 14 consacré pour la boulangerie, les deux panneaux électriques MA-E2-0106 et MA-E2-0105 qui alimentent à leurs tours le coin pâtisserie et poissons ainsi que autres équipement non spécifiés et installés dans le marché Metro.

Nous présentons dans ce qui suit les résultats des mesures expérimentales réalisées afin d'avoir la charge totale du panneau MA-D2-0102. Mais avant de présenter les résultats, il faut savoir que nous n'avons pu mesurer qu'un seul câble par phase entrante vers le panneau alors que chaque phase comporte quatre câbles. Donc, il faudrait multiplier les données obtenues des courants et puissances par le facteur quatre.

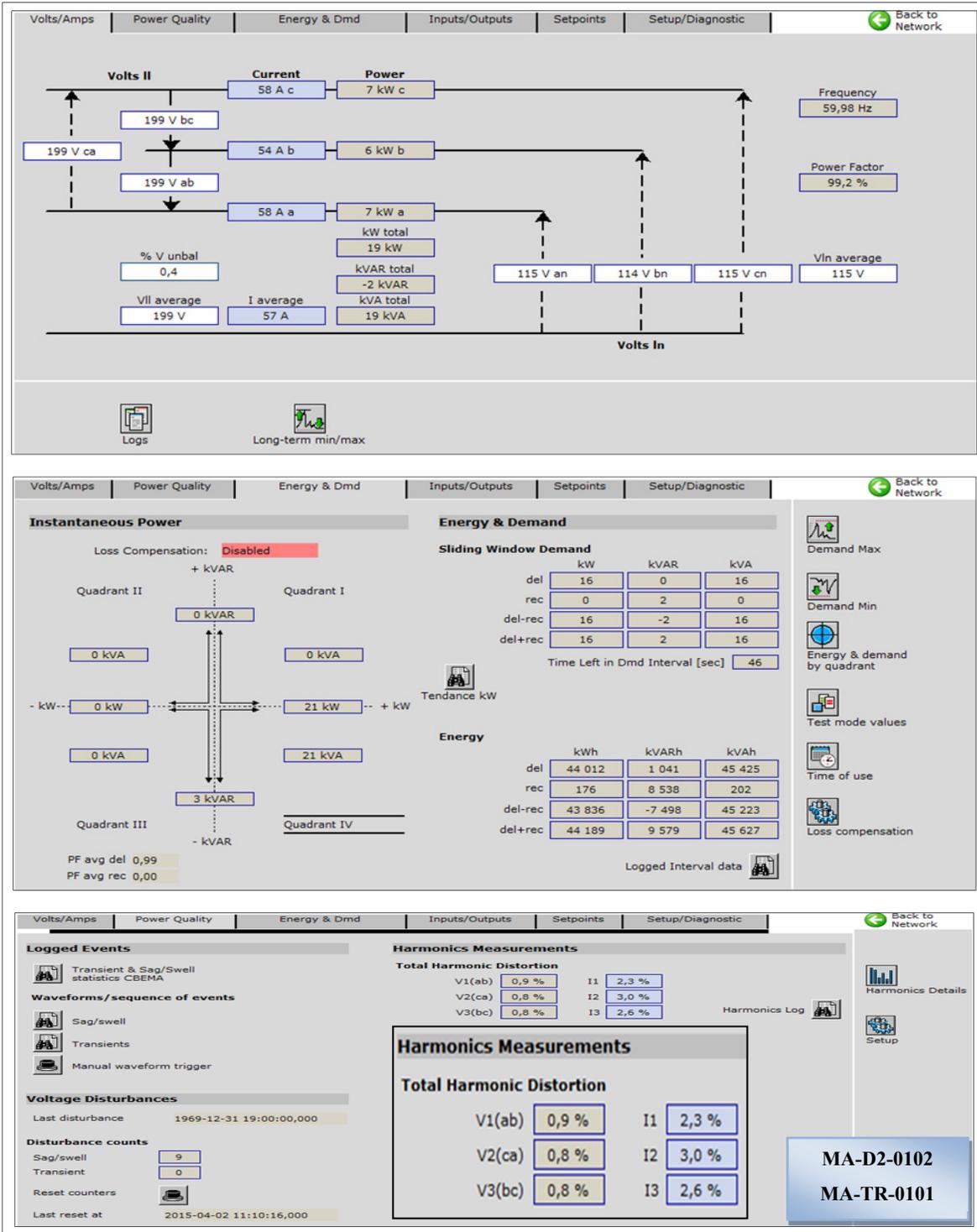


Figure 3.198 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau MA-D2-0102-TRANSFO MA-TR-0101

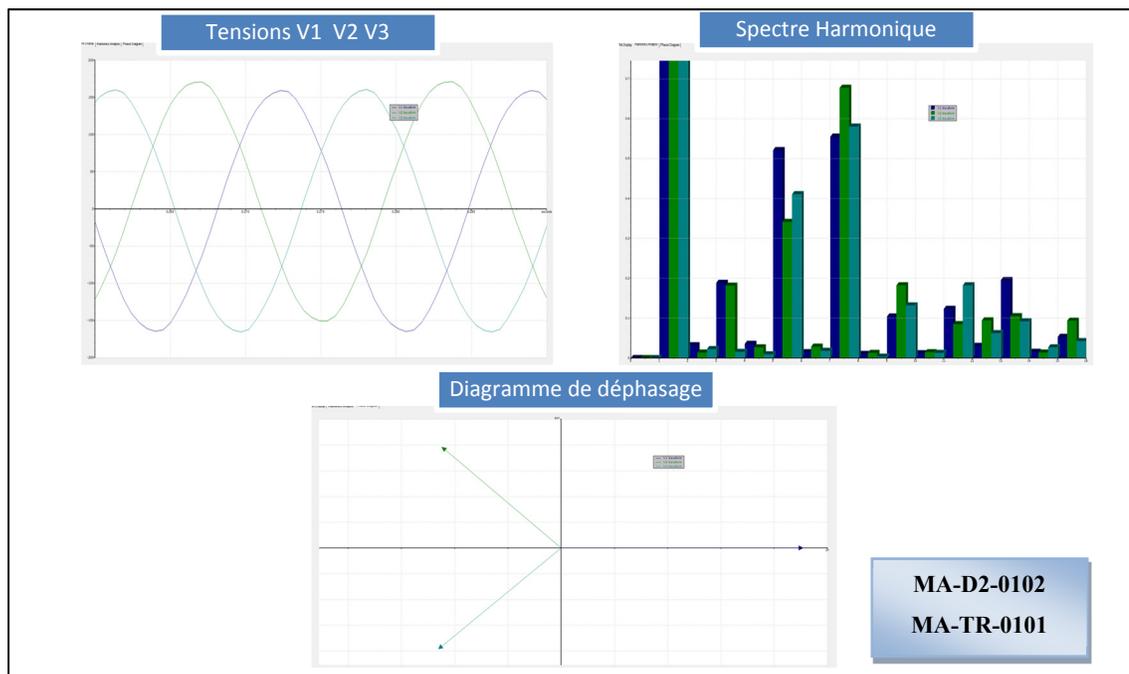


Figure 3.199 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau MA-D2-0102 connecté au transfo MA-TR-0101

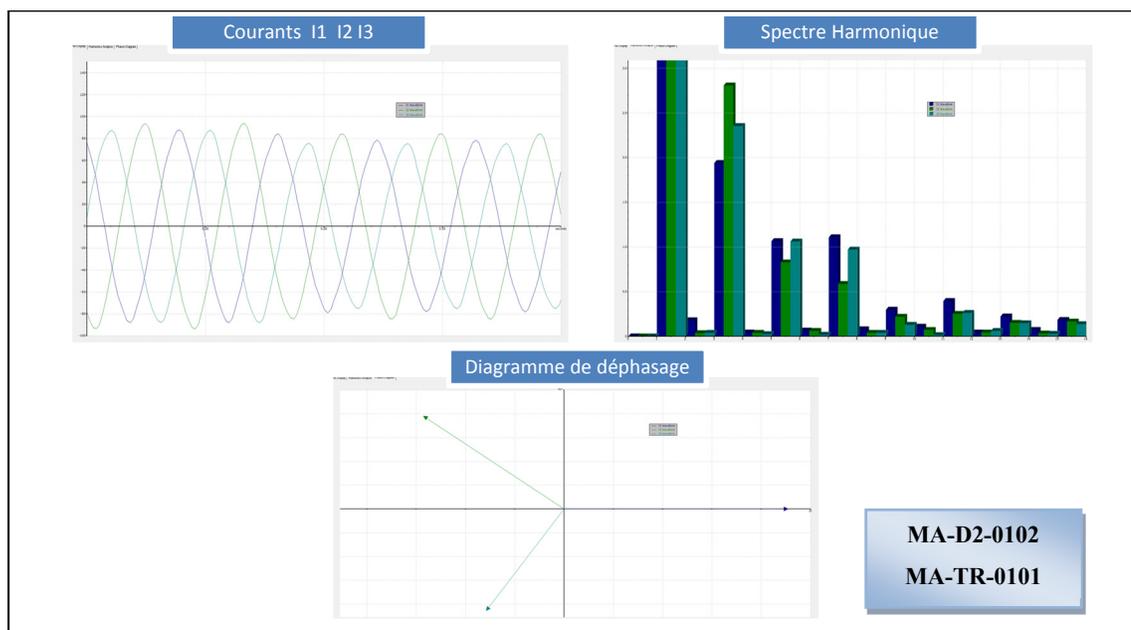


Figure 3.200 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau MA-D2-0102 connecté au transfo MA-TR-0101

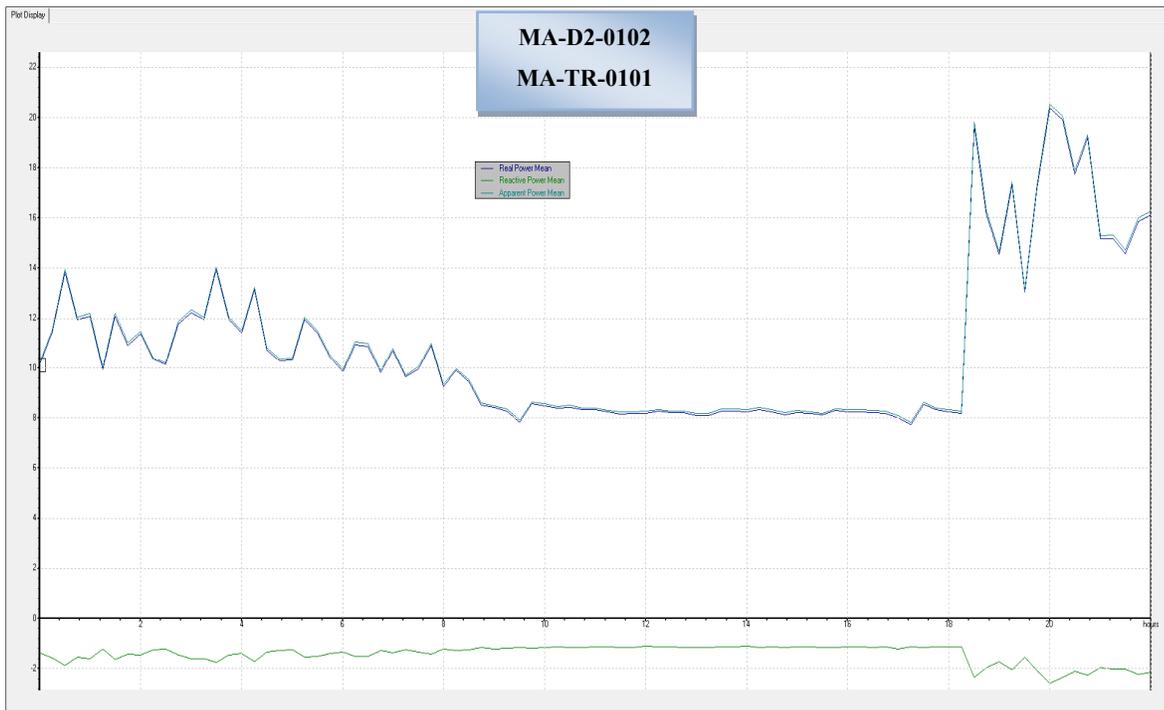


Figure 3.201 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau MA-D2-0102-TRANSFO MA-TR-0101

Le deuxième transformateur que nous avons mesuré est le transformateur MA-TR-0102, il est de puissance apparente nominale égale à 250kVA. Ce transformateur alimente un panneau électrique qui est le MA-D2-0101. Ce dernier alimente à son tour plusieurs autres panneaux comme MA-E2-0301 (E), MA-E2-0103 (H), MA-E2-0102 (D), MA-E2-0201 (B) et MA-E2-0101 (C).

De leur côté, ces panneaux alimentent les rails de type F, la hotte 1109, un compresseur, une emballeuse digitale, le stationnement et l'éclairage. Ils alimentent aussi le contrôleur de pack MEO, des ventilateurs de transfert VT-11 au MA-01 et VT-11 au MA-41, des ventilateurs d'évacuation comme VE-11 au MA-21 et VE-11 au MA-22 et la salle mécanique niveau 1. Autres charges sont alimentées par ces panneaux comme deux autres hottes, un ascenseur, un chargeur pour la génératrice, des câbles chauffants, un ventilateur au plafond, un chargeur à batterie, une machine à cuvette et les bureaux et réception du marché Metro.

Le panneau MA-D2-0101 connecté au transformateur MA-TR-0102 est donné par la figure 3.202.

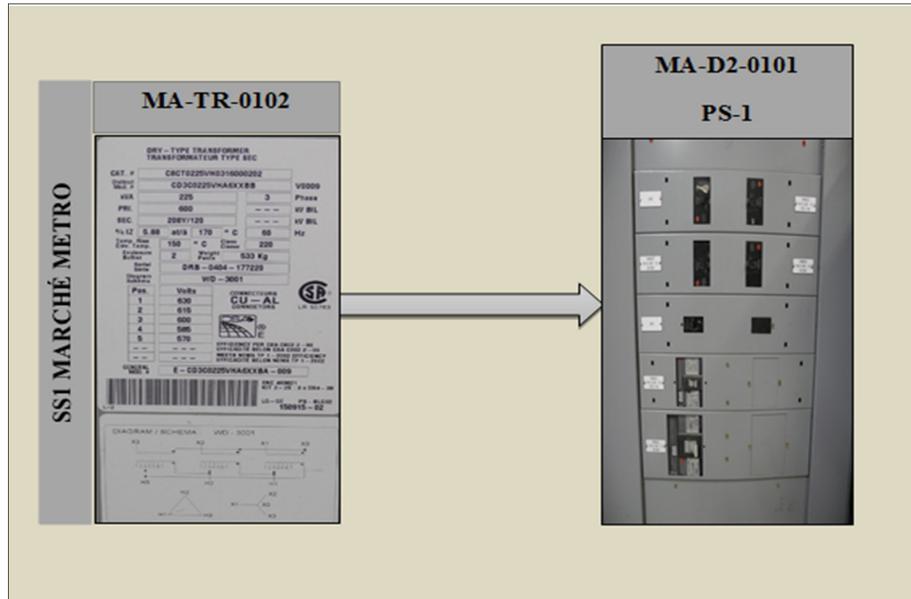


Figure 3.202 Charge alimentée par le transformateur MA-TR-0102

Les figures 3.203, 3.204, 3.205, et 3.206 donnent les mesures expérimentales en temps réel en termes de puissances, courants, tensions, taux de distorsion harmonique et spectre harmoniques des courants et tensions au bornes du panneau MA-D2-0101. Aussi pour ce panneau, il faudrait multiplier les résultats des courants et puissances par le facteur trois étant donné que nous n'avons mesuré qu'un seul câble parmi les trois entrants par phase.

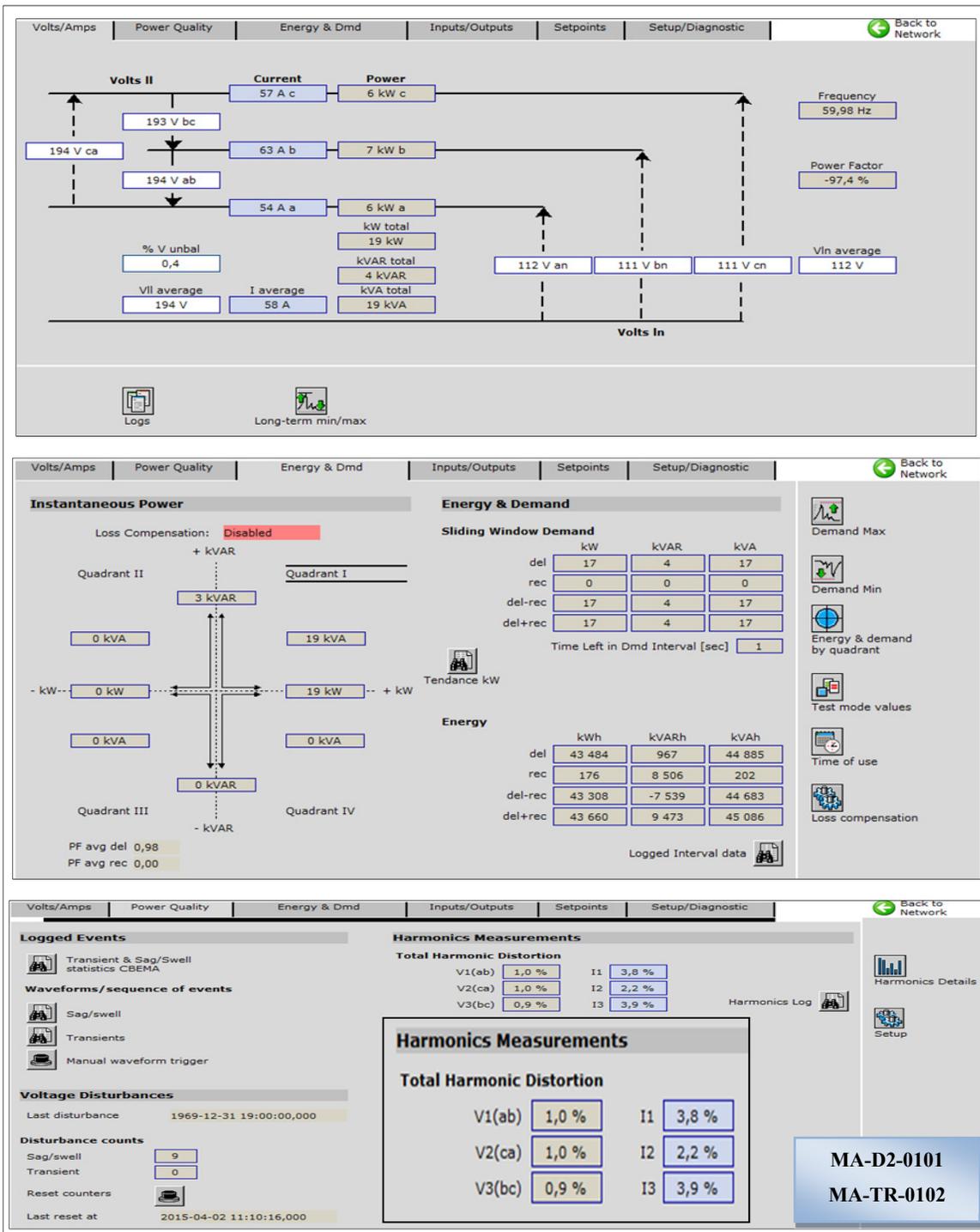


Figure 3.203 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau MA-D2-0101-TRANSFO MA-TR-0102

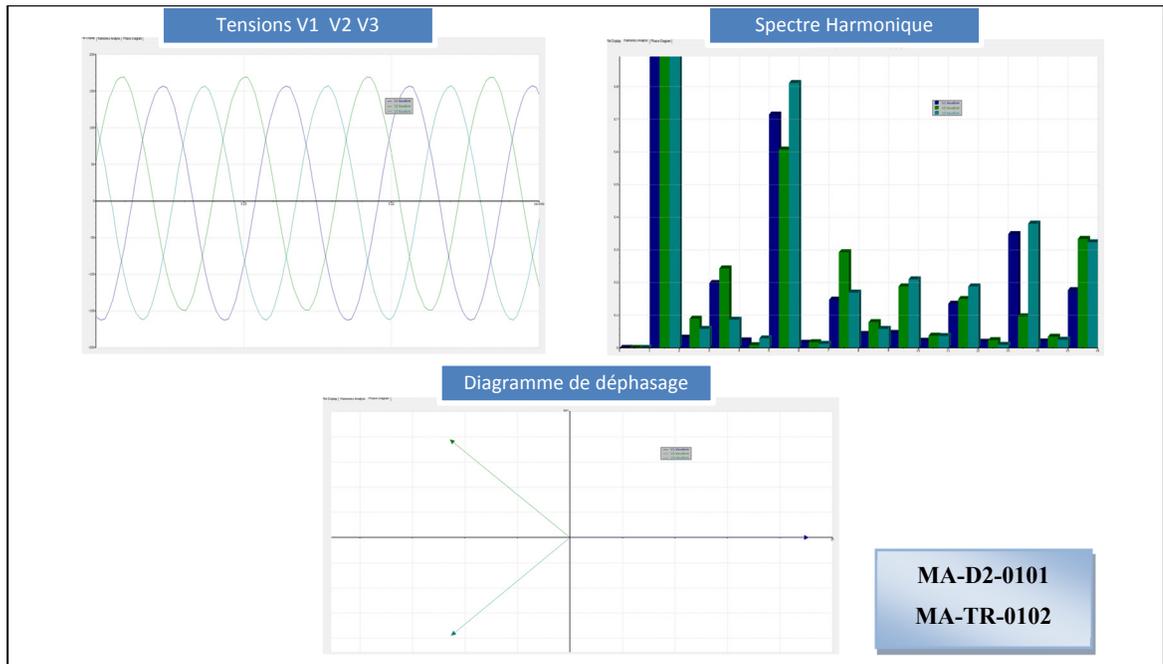


Figure 3.204 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau MA-D2-0101 connecté au TRANSFO MA-TR-0102

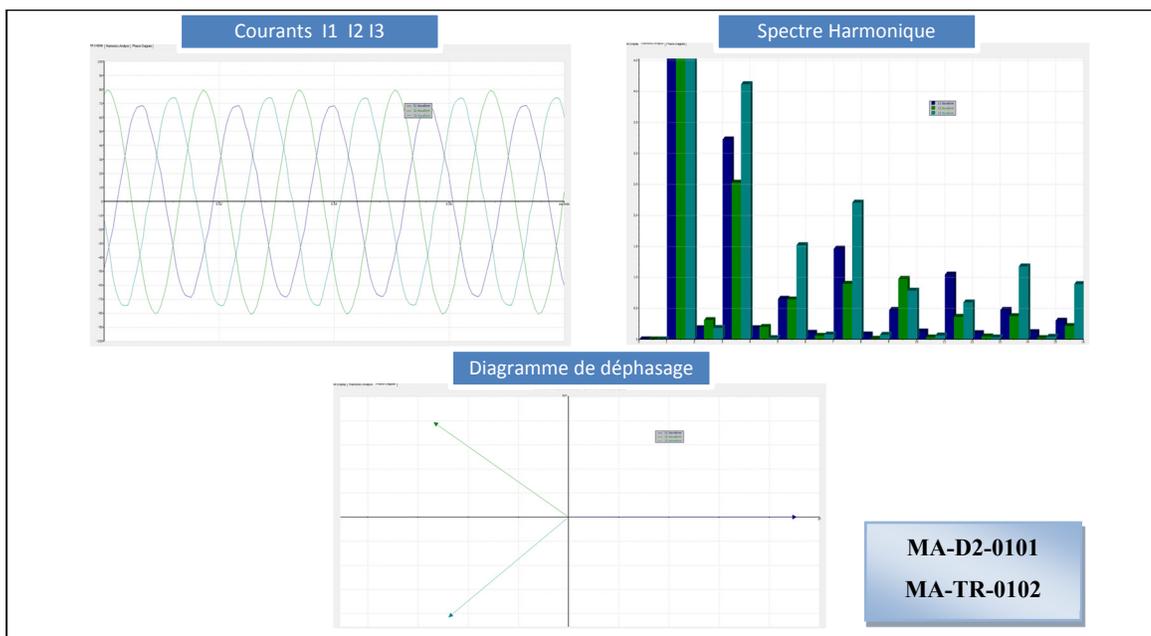


Figure 3.205 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau MA-D2-0101 connecté au TRANSFO MA-TR-0102

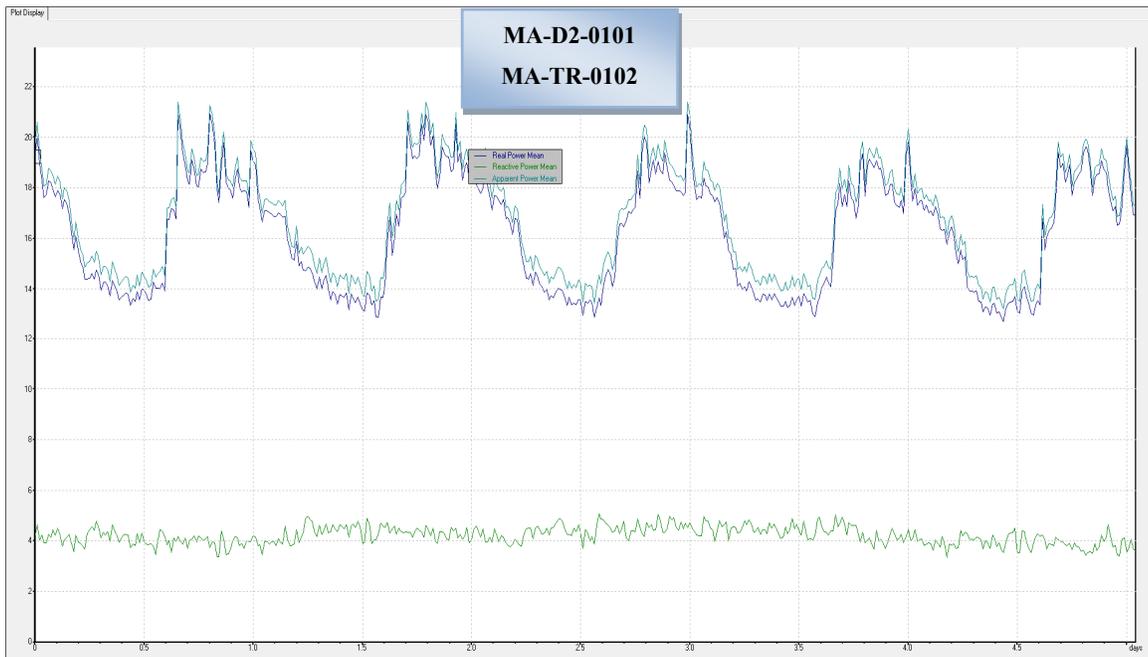


Figure 3.206 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau MA-D2-0101-TRANSFO MA-TR-0102

Les mesures en temps réel de chaque charge alimentée par chaque transformateur de puissance apparente nominale supérieure ou égale à 100kVA ont été reprises pour les transformateurs installés dans la résidence PH4.

3.1.6 Mesure en temps réel de la charge de la résidence PH4

La résidence PH4 est la quatrième et la plus récente résidence qui a été construite pour les étudiants de l'ÉTS. Cette résidence fait partie du campus universitaire d'où notre intérêt à connaître la consommation en temps réel de ce bâtiment.

Ainsi, comme c'était fait pour les bâtiments vus précédemment, nous nous sommes servis des trois analyseurs pour mesurer la consommation en temps réel de toute charge alimentée par tout transformateur installé dans la résidence PH4 et possédant une puissance apparente nominale égale à 100kVA et plus.

Le tableau 3.6 illustre les spécifications prélevées des plaques signalétiques des transformateurs de 100kVA et plus alimentant la résidence PH4.

Tableau 3.6 Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans la résidence PH4

Local	TRANSFO	No. De catalogue	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
RESIDENCE PH4							
R4-105	TL-RA	9T83K9896	5,10%	150	600	208Y/120	D/y
R4-123	TL-RB	9T83K9897	5,40%	225	600	208Y/120	D/Y
R4-904	TRANSFO TL-8A	9T83K9897	5,40%	225	600	208Y/120	D/y
R4-913	TRANSFO TL-8B	9T83K9897	5,40%	225	600	208Y/120	D/Y

Par la suite, nous avons connecté les analyseurs au niveau de chaque charge alimentée par chacun de ces quatre transformateurs figurant dans le tableau 3.6.

Nous avons commencé nos mesures avec le transformateur TL-RA qui est installé au 1^{er} étage dans la salle R4-105. Il s'agit d'un transformateur de 150kVA qui alimente le panneau électrique PDS-RA installé dans la même salle R4-105. Nous pouvons voir le transformateur TL-RA ainsi que le panneau alimenté par celui-ci sur la figure 3.207

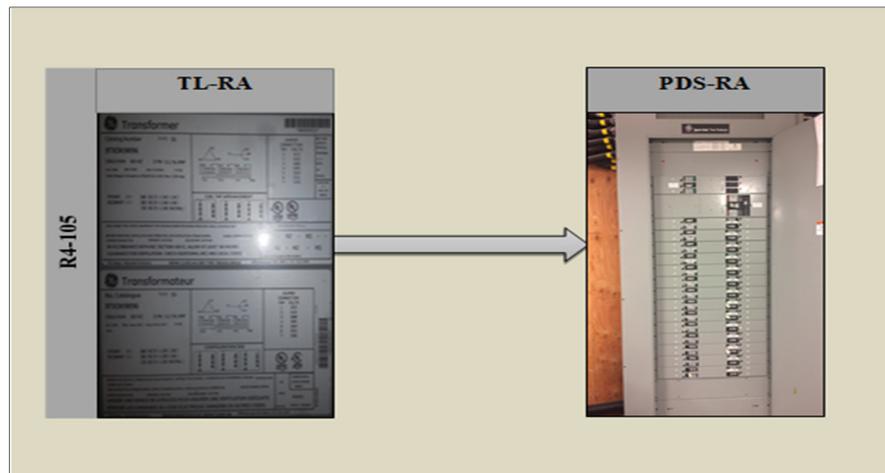


Figure 3.207 Charge alimentée par le transformateur TL-RA

Le panneau PDS-RA alimente tous les panneaux électriques installés dans chaque maison ou chambre de la résidence PH4 et dans le même secteur que l'endroit où est installé PDS-RA. Parmi ces logements qui sont alimenté par ce panneau nous pouvons mentionner les logements allant de #107 jusqu'à #116 et de #205 jusqu'à #214 à l'exception de #113, #114, #207, #209. De plus, PDS-RA alimente le panneau PS-RA tel qu'il alimente des prises de sous-sol, du corridor du rez-de-chaussée, 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} étage, l'ouvre porte SS, un câble chauffant, une thermopompe, des prises lampadaires, trois pompes PCR-N5, PCR-N6 et PCR-N7, l'éclairage extérieur, l'éclairage pour l'ascenseur et un ventilateur d'évacuation VE-1.

Grâce aux mesures réalisées à l'aide des analyseurs à la sortie du transformateur TL-RA, autrement dit au niveau du panneau PDS-RA, nous avons pu avoir en temps réel non seulement les formes d'onde des courants et des tensions mais aussi leurs spectres harmoniques et les valeurs de leurs taux de distorsions harmoniques THD. De plus, ces mesures nous ont permis d'avoir l'évolution des puissances actives, réactives et apparentes aux bornes du panneau PDS-RA.

Tous ces résultats sont donnés par les figures 3.208, 3.209, 3.210 et 3.211. Cependant avant de présenter les résultats obtenus, il faudrait indiquer que toutes les données relatives aux courants et puissances seront multipliées par le facteur 2 puisque les pinces de mesures de notre analyseur n'ont pas pu contenir les deux câbles que comporte chaque phase entrante vers le panneau PDS-RA.

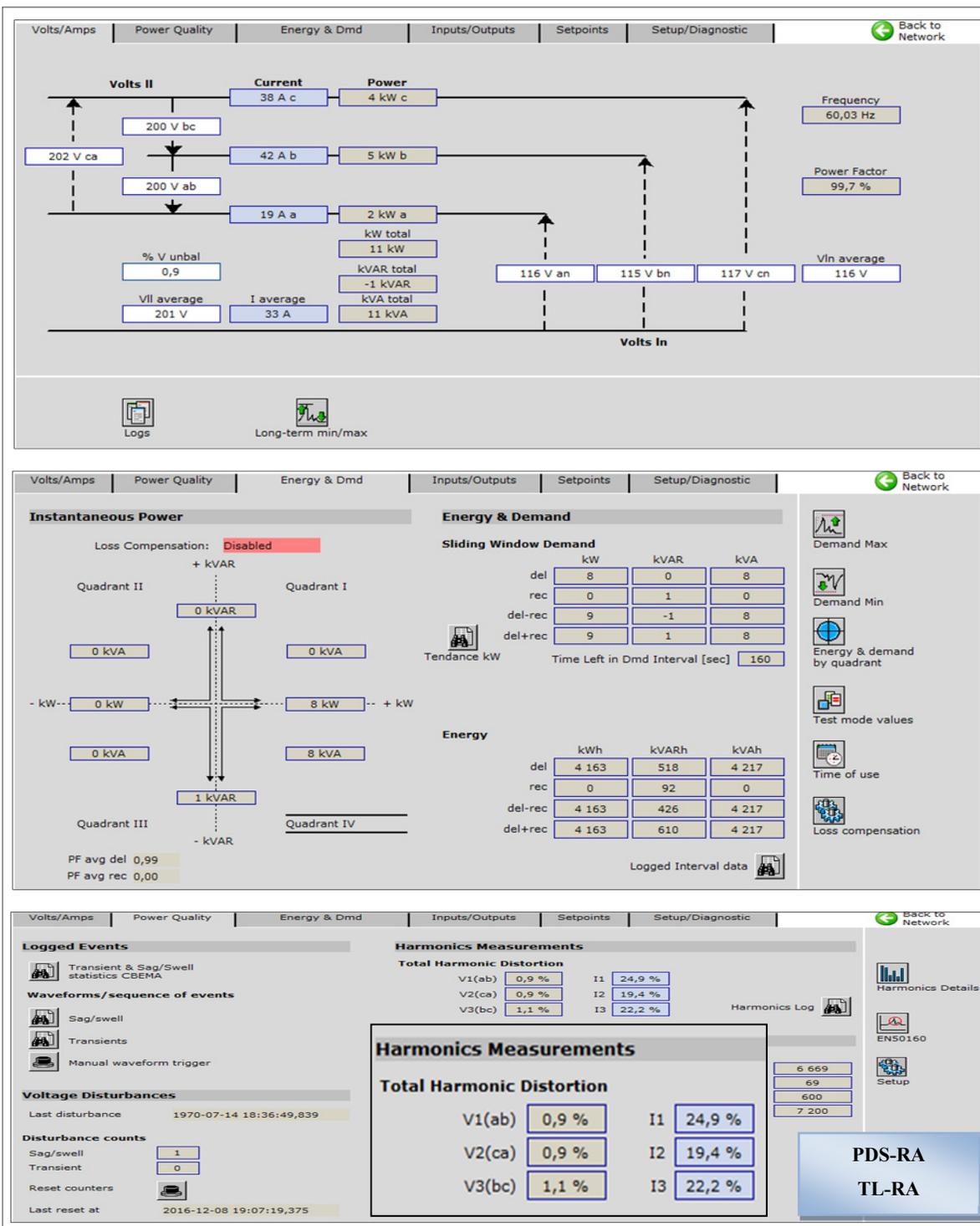


Figure 3.208 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PDS-RA-TRANSFO TL-RA

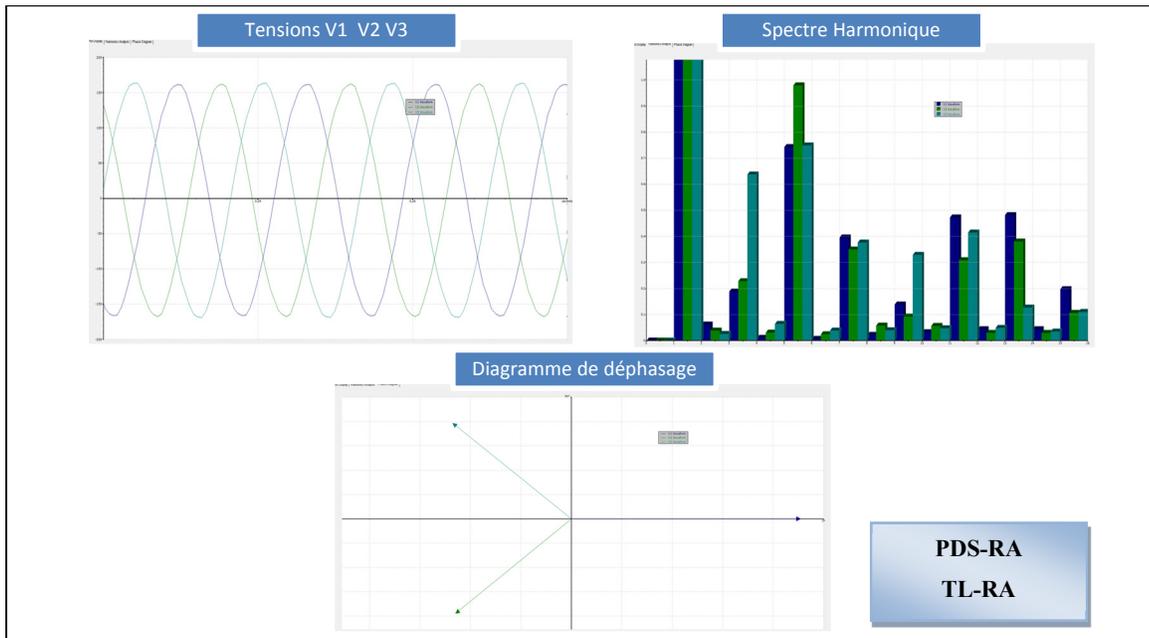


Figure 3.209 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PDS-RA-TRANSFO TL-RA

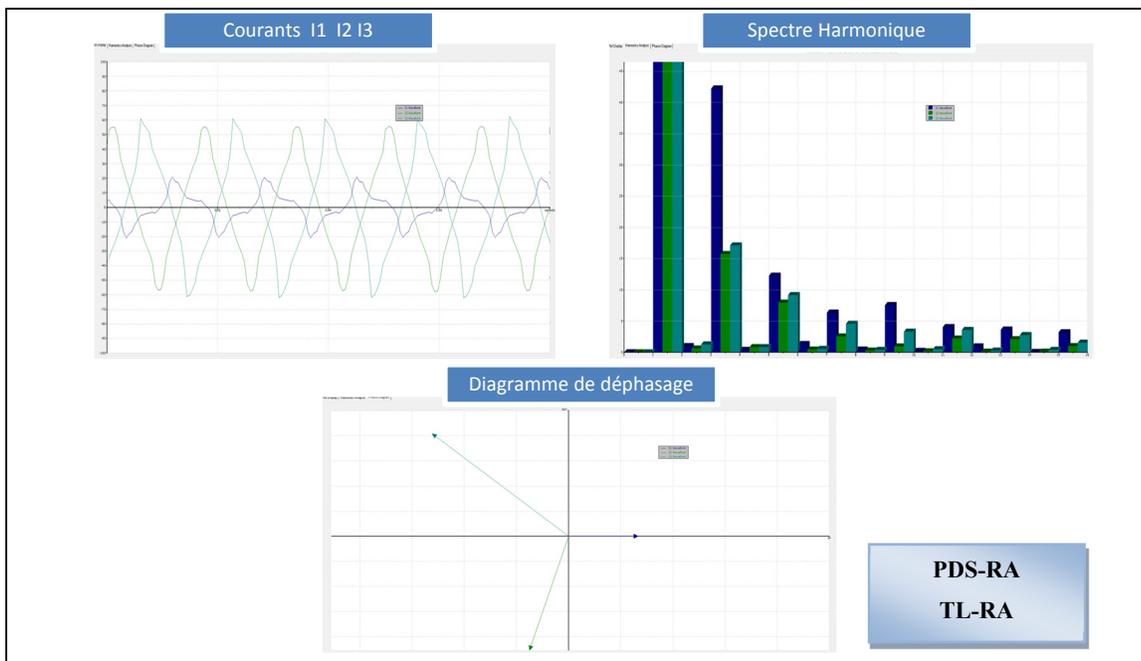


Figure 3.210 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PDS-RA-TRANSFO TL-RA

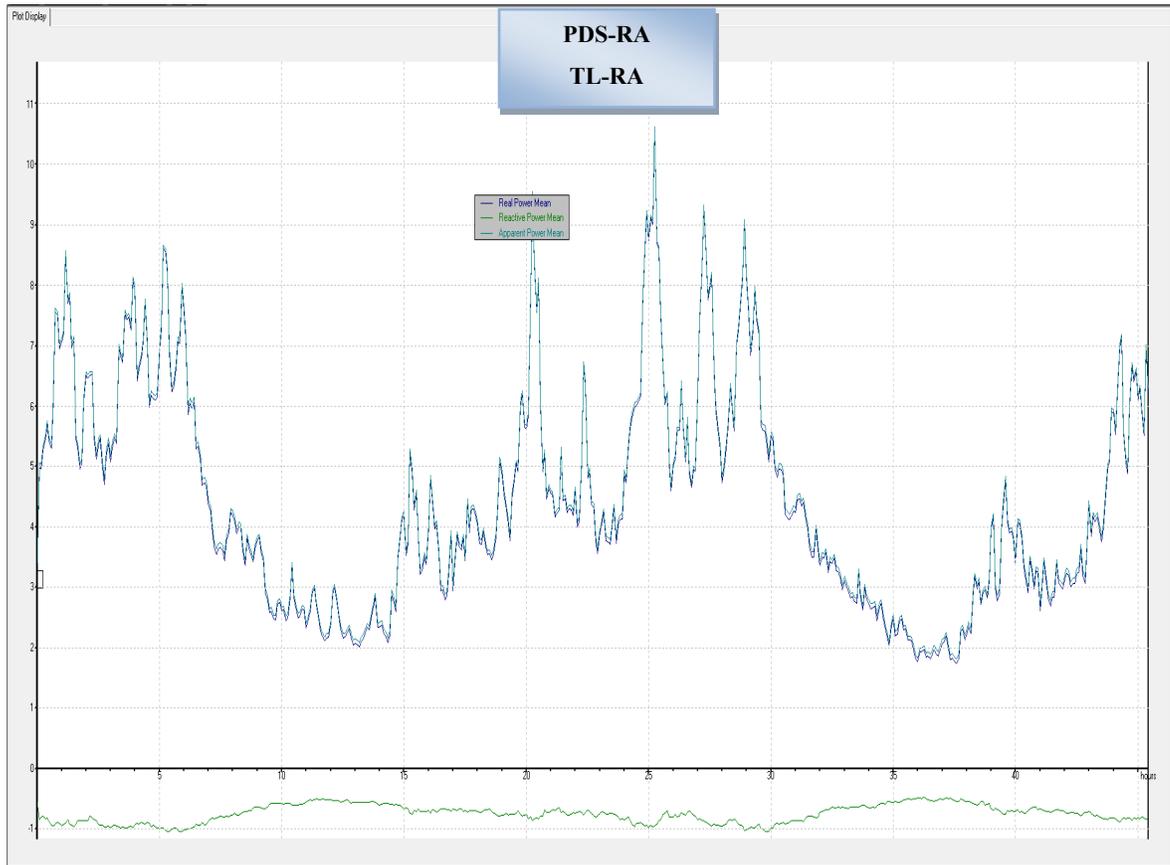


Figure 3.211 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PDS-RA-TRANSFO TL-RA

Pas très loin du local 105 ; où le transformateur TL-RA est installé, nous avons rencontré un autre transformateur TL-RB installé au local 123 de la résidence PH4. Le transformateur TL-RB, ayant une puissance apparente nominale égale à 225kVA, alimente le panneau électrique PDS-RB.

Ce panneau alimenté par le transformateur TL-RB est donné par la figure 3.212.

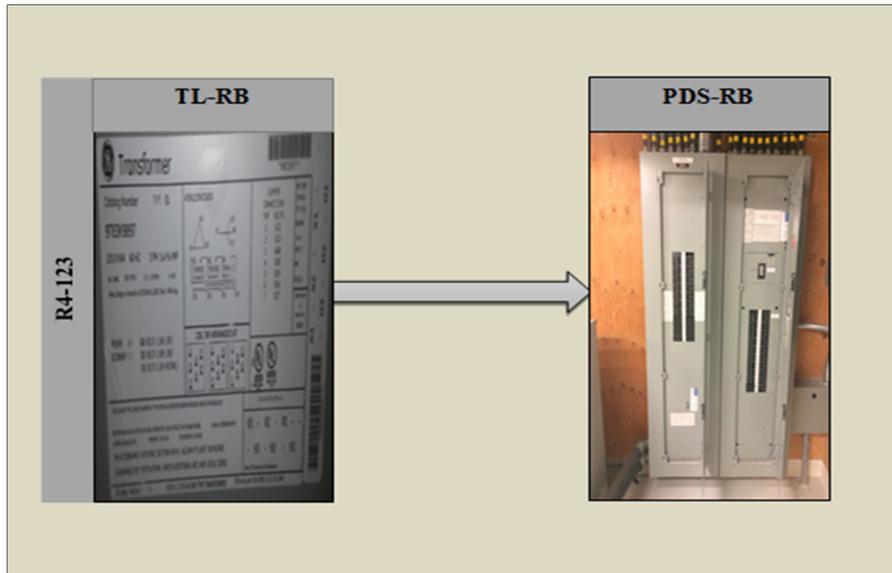


Figure 3.212 Charge alimentée par le transformateur TL-RB

Le panneau PDS-RB alimente tous les panneaux électriques des logements localisés dans le même secteur que l'endroit où est installé PDS-RB tels que : #119, #121, #122, #124, #126, #127, #128, #129, #130, #131, #132, #134, #136, #222, #223, #224, #226, #227, #228, #229, #230, #231, #232, #233, #234, #235, #236, #237, #238, #239 et #240.

De plus, le panneau PDS-RA alimente autres panneaux comme le panneau PS-RB qui alimente de son côté des prises du sous-sol, du corridor du rez-de-chaussée, 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} étage. Il alimente de même la porte du garage, l'ouvre porte passerelle, un câble chauffant, une thermopompe TPS2 au local R4-135, des prises pour éclairage extérieur, l'éclairage pour l'ascenseur et l'enseigne extérieure.

Plusieurs pompes comme la pompe GLYCOL, PCR-N1, PCR-N2, PCR-N3, PCR-N4, PCR-N8 et PCR-N9 sont aussi alimentées par le panneau PDS-RA, ainsi que le compresseur au sous-sol R4-S045, des ventilateurs d'évacuation VE-6 et VE-5, un ventilateur d'alimentation VA-1, et une unité d'air neuve.

Nous allons donner dans ce qui suit les résultats des mesures en temps réel effectué aux bornes du panneau TL-RB pour avoir une idée plus précise sur sa consommation. Par contre, tel qu'il était mentionné pour le panneau TL-RA, il faudrait multiplier pareillement les résultats obtenus relatives aux courants et puissances par le facteur deux vu que nous n'avons mesuré qu'un seul câble parmi deux entrants par phase vers le panneau électrique TL-RB. Les mesures obtenues sont présentées ci-dessous :

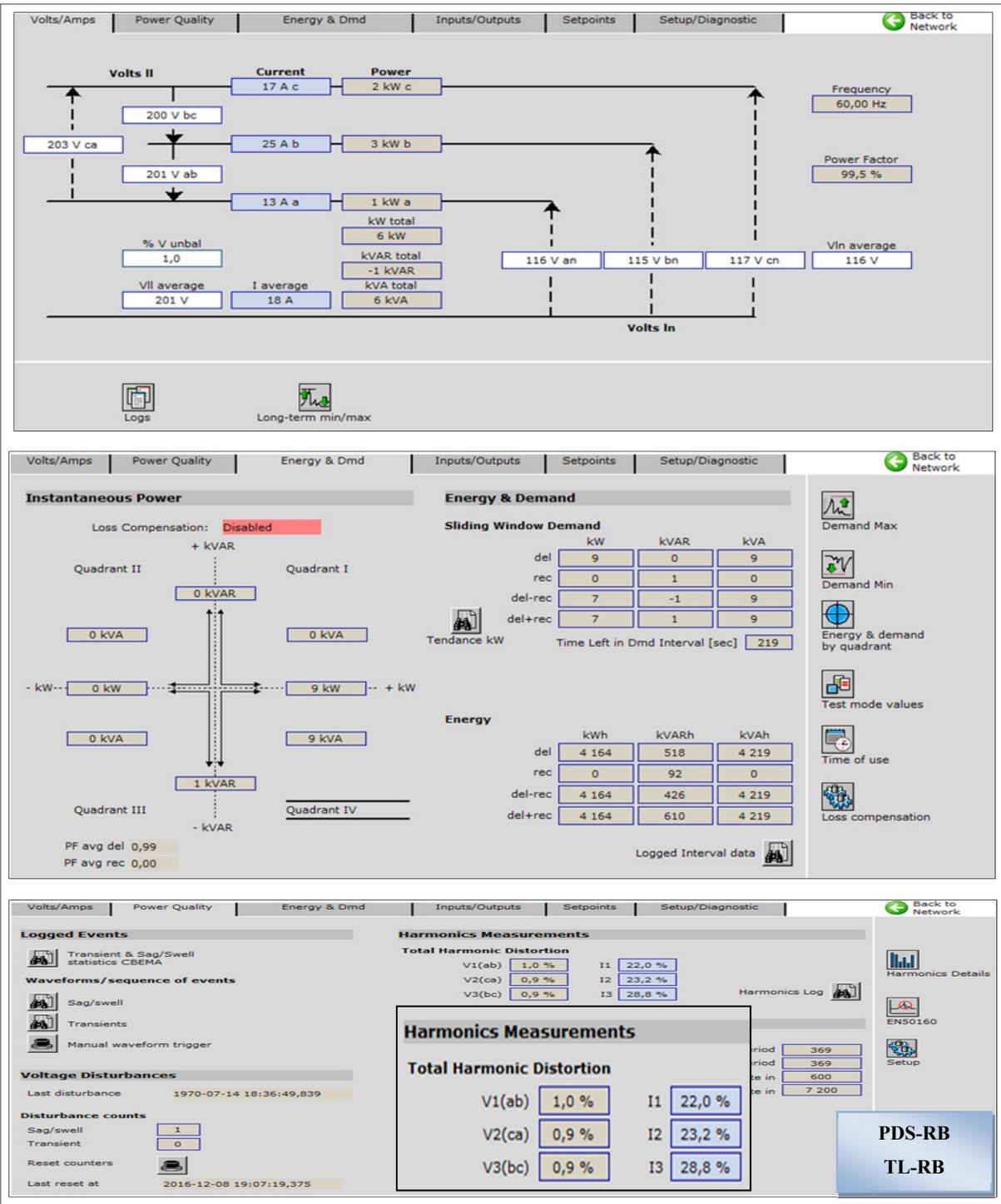


Figure 3.213 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PDS-RB-TRANSFO TL-RB

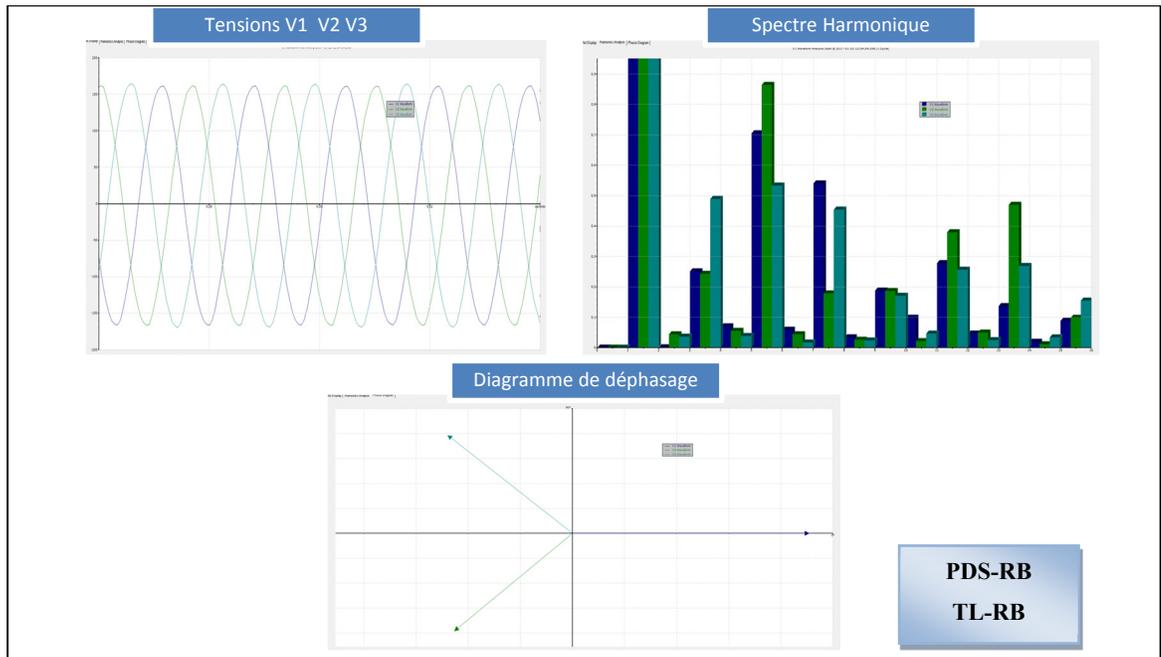


Figure 3.214 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PDS-RB-TRANSFO TL-RB

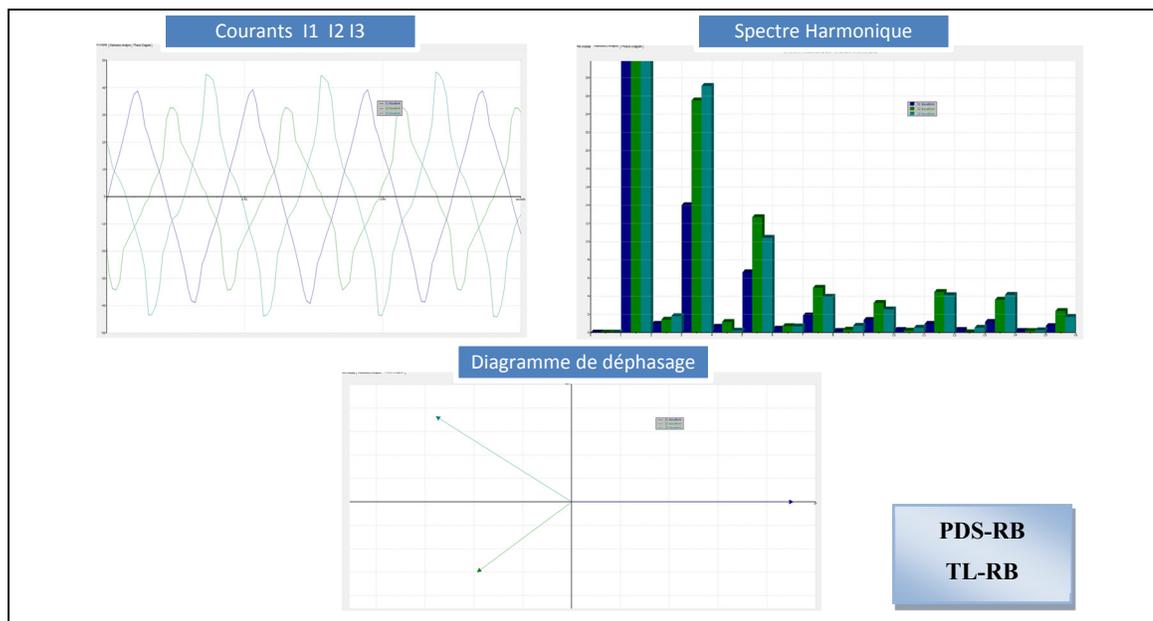


Figure 3.215 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PDS-RB-TRANSFO TL-RB

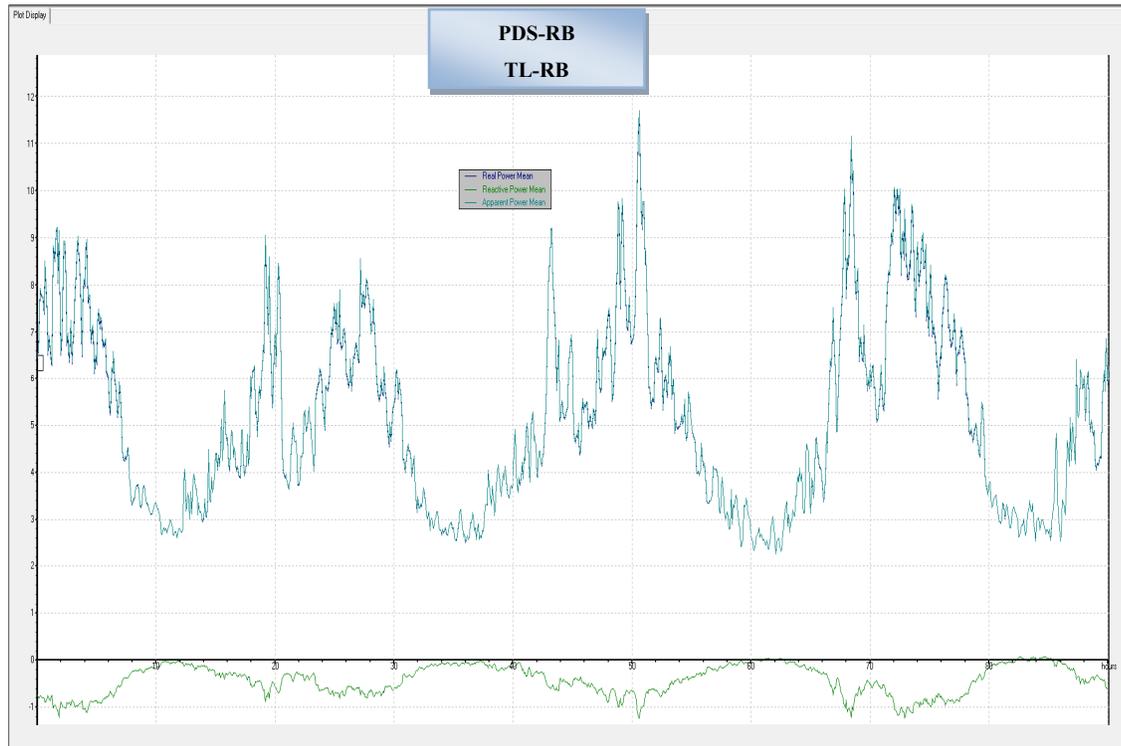


Figure 3.216 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PDS-RB-TRANSFO TL-RB

Le troisième transformateur mesuré parmi ceux qui sont installés dans la résidence PH4 est celui qui est installé dans le local R4-904 ; Il s'agit du transformateur TL-8A. Ce transformateur alimente le panneau PDS-8A installé dans même salle que R4-904 comme le montre la figure 3.217.

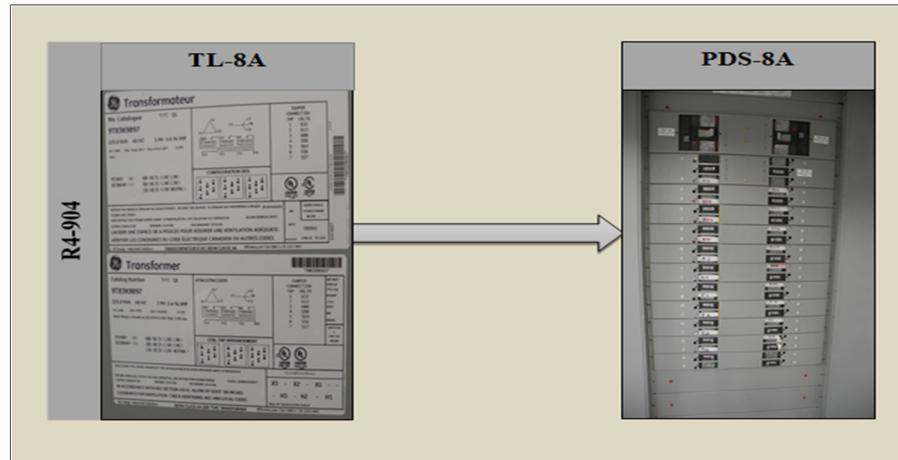


Figure 3.217 Charge alimentée par le transformateur TL-8A

D'autre part, le panneau PDS-8A est connecté à plusieurs charges comme les trois autres panneaux PDL-4A, PDL-6A et PS-8A.

Le PDS-8A alimente les panneaux électriques des logements localisés dans le même secteur où il est installé ; c'est-à-dire les logements allant de #802A jusqu'à #822 avec un pas de 2 et à l'exception de #808A et des logements allant de #902 jusqu'à #911 en leur rajoutant le logement #919A et à l'exception de #904 et #905.

Quant au panneau PS-8A, il alimente des prises des corridors du 4^{ème}, 5^{ème}, 6^{ème}, 7^{ème} et 8^{ème} étage, des prises des salles électriques du 4^{ème}, 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} étage, des prises de conciergerie au 4^{ème}, 5^{ème}, 6^{ème}, 7^{ème} et 8^{ème} étage, un compresseur UTA-2-CP et un ventilateur d'évacuation VE-2.

Les résultats des mesures en temps réel effectuées aux bornes du panneau PDS-8A sont donnés par les figures 3.218, 3.219, 3.220 et 3.212. Il faudrait juste multiplier les données des courants et puissance que nous allons présenter par le facteur deux étant donné que les résultats qui seront présentés représentent les résultats de mesure d'un seul câble par phase entrante vers le panneau PDS-8A alors que chaque phase comporte deux câbles.

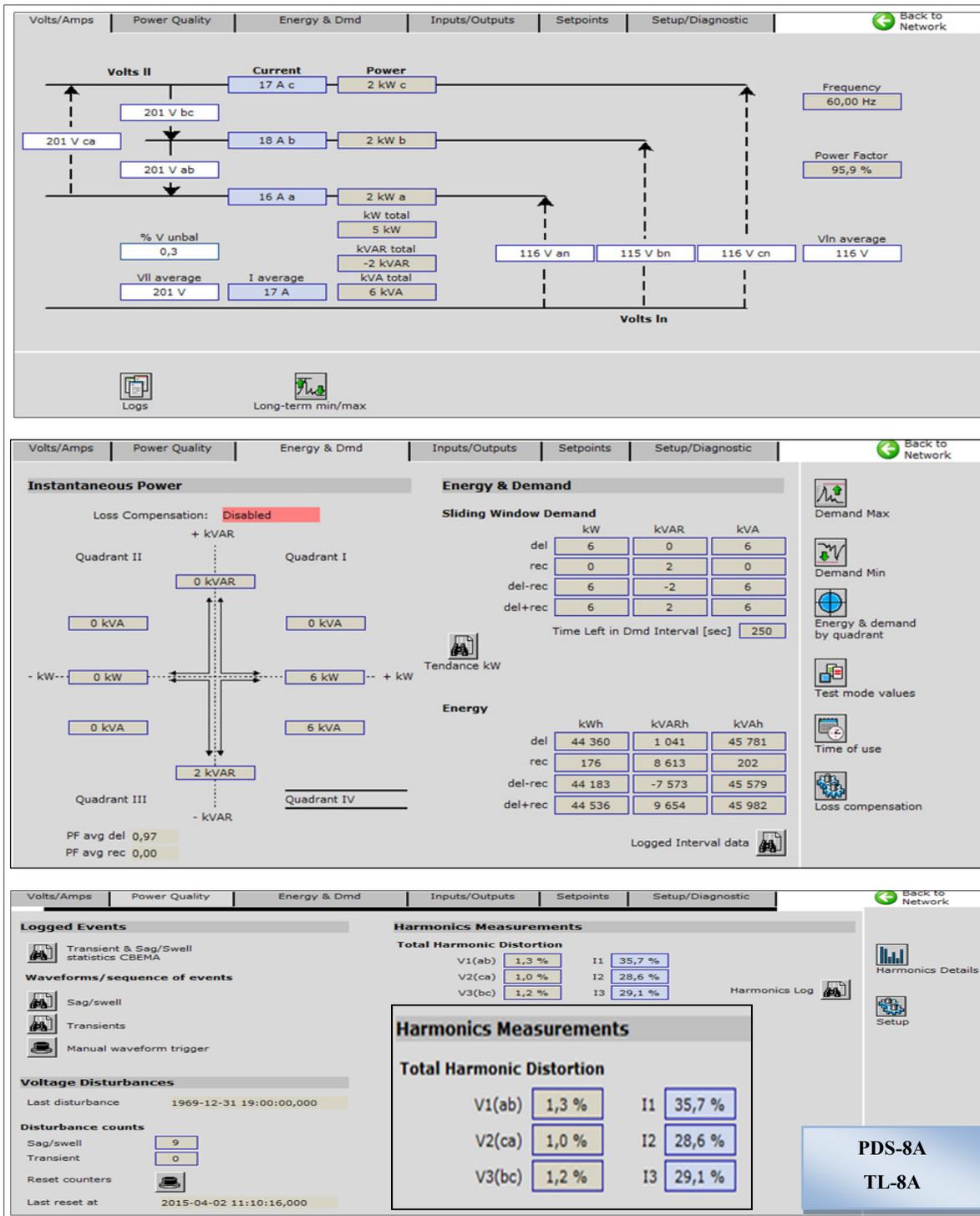


Figure 3.218 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PDS-8A-TRANSFO TL-8A

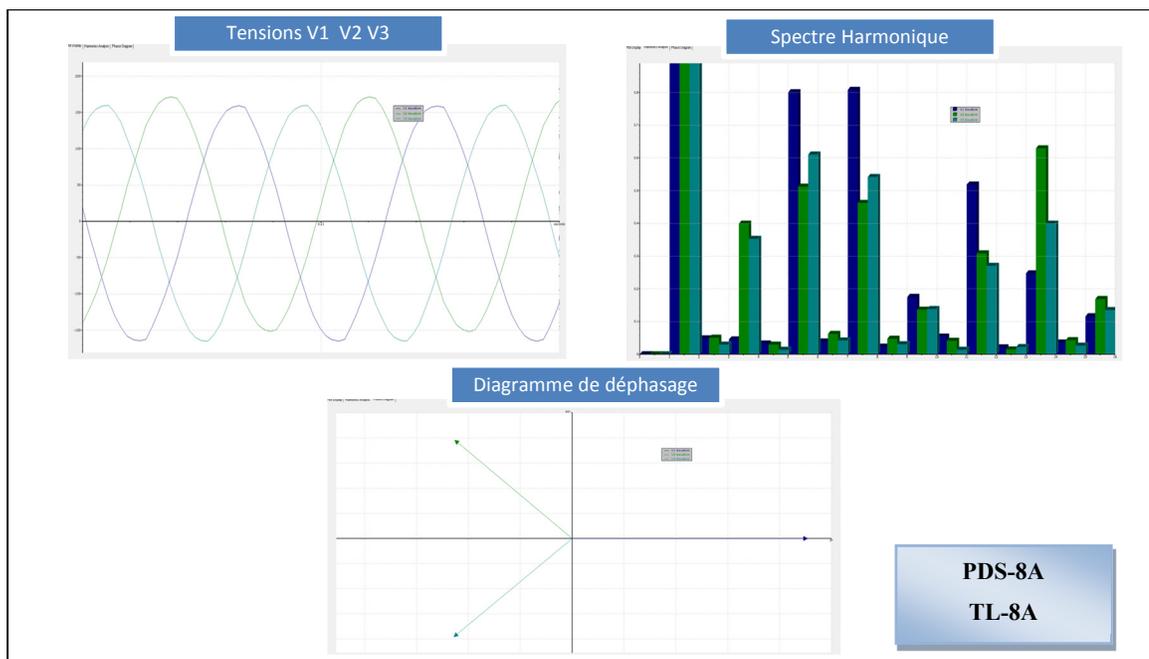


Figure 3.219 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PDS-8A-TRANSFO TL-8A

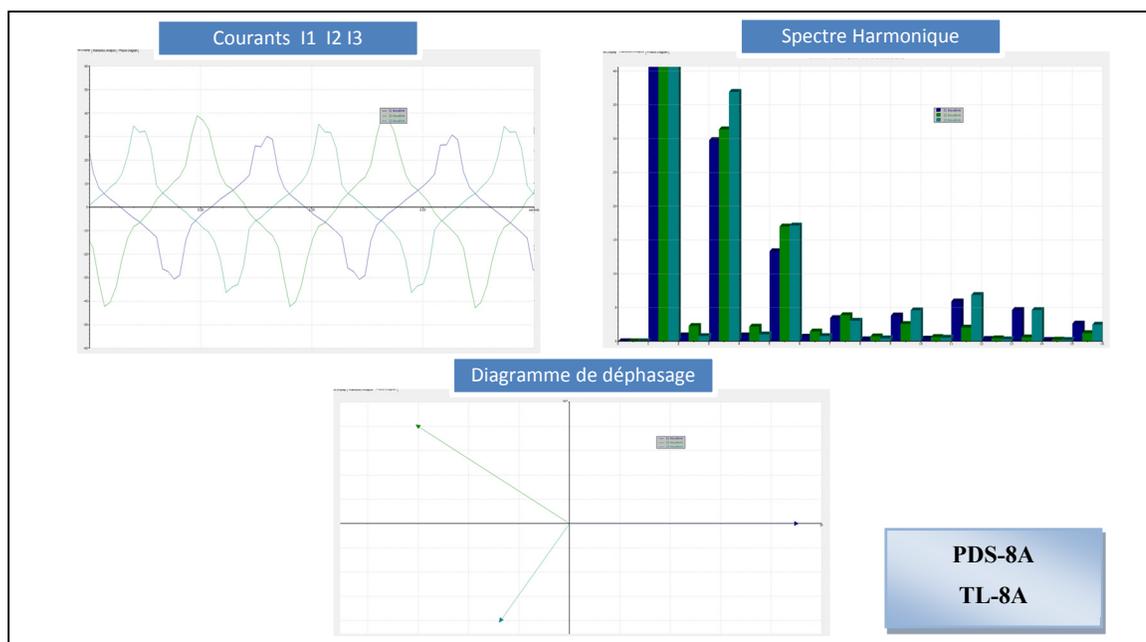


Figure 3.220 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PDS-8A-TRANSFO TL-8A



Figure 3.221 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PDS-8A-TRANSFO TL-8A

Pour finir avec la résidence PH4, nous avons mesuré le quatrième et dernier transformateur ayant une puissance apparente nominale supérieure à 100kVA et qui est égale à 225kVA. C'est le transformateur TL-8B installé au local R4-913 qui alimente le panneau PDS-8B et qui est donné par la figure 3.222.

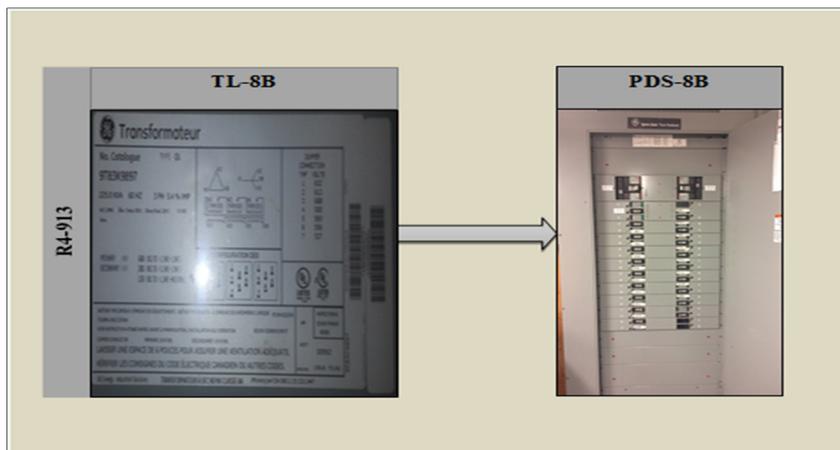


Figure 3.222 Charge alimentée par le transformateur TL-8B

Le panneau PDS-8B alimente les panneaux électriques installés dans les logements allant de #824A jusqu'à #828 avec un pas égale à 2, de #832 jusqu'à #840 à l'exception de #833 et allant de #912 jusqu'à #921 à l'exception de #913, #918 et #919.

Quant au panneau PS-8B, il alimente des prises des corridors du 4^{ème}, 5^{ème}, 6^{ème}, 7^{ème} et 8^{ème} étage, des prises des salles électriques du 4^{ème}, 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} étage, une pompe GLYCOL au 8^{ème} étage, les ascenseurs ASC#1 et ASC#2, un compresseur UTA-1-CP, un ventilateur dans la salle mécanique à coté de ASC#1 et ASC#2 et un ventilateur d'évacuation VE-4.

Suite aux mesures réalisées aux bornes du panneau PDS-8B, nous présentons dans la suite les formes d'ondes des courants et tensions, leurs taux de distorsions harmoniques, leurs spectres harmoniques et les profils des puissances actives, réactives et apparentes obtenus en temps réel et traduisant la consommation du panneau PDS-8B.

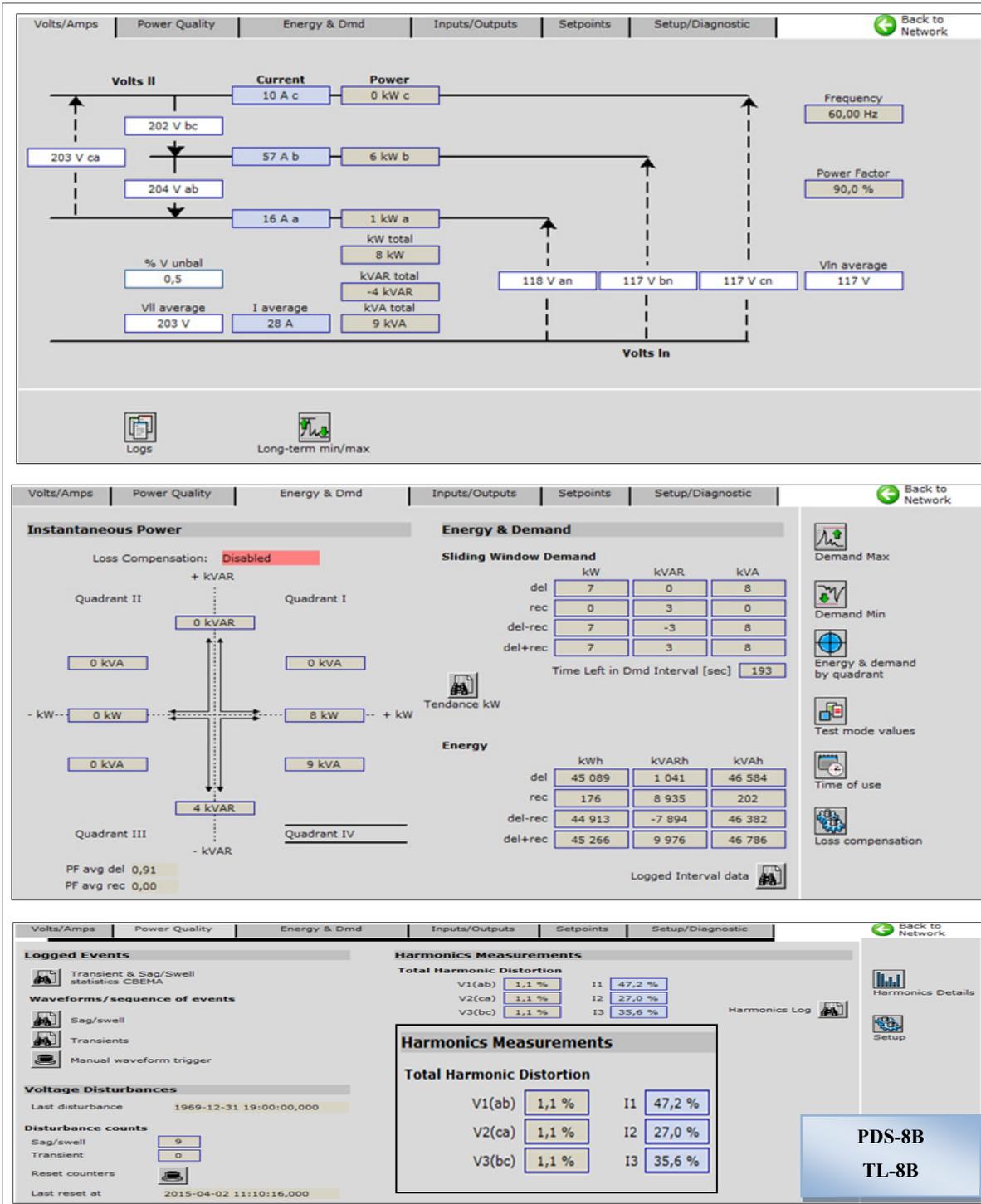


Figure 3.223 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau PDS-8B-TRANSFO TL-8B

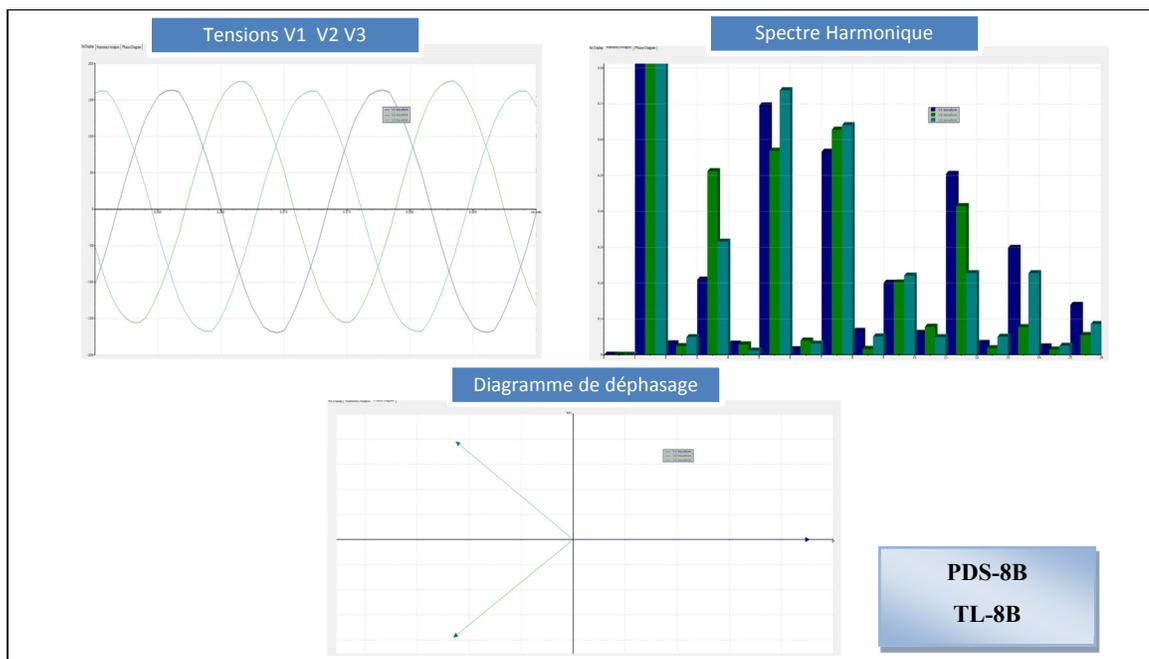


Figure 3.224 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau PDS-8B-TRANSFO TL-8B

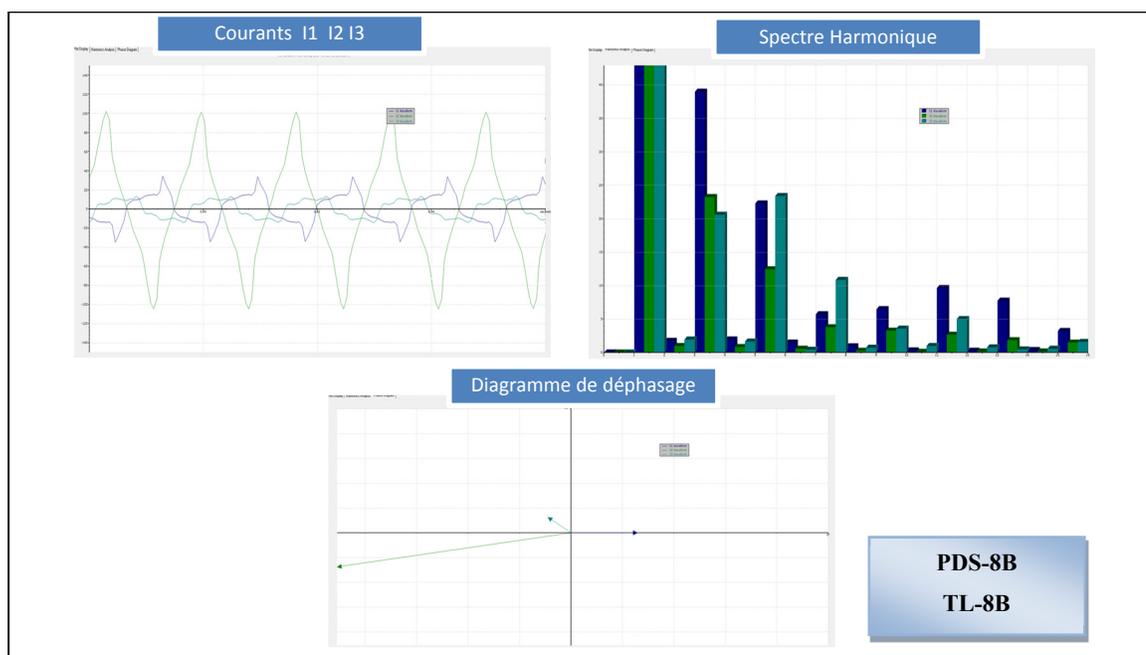


Figure 3.225 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau PDS-8B-TRANSFO TL-8B

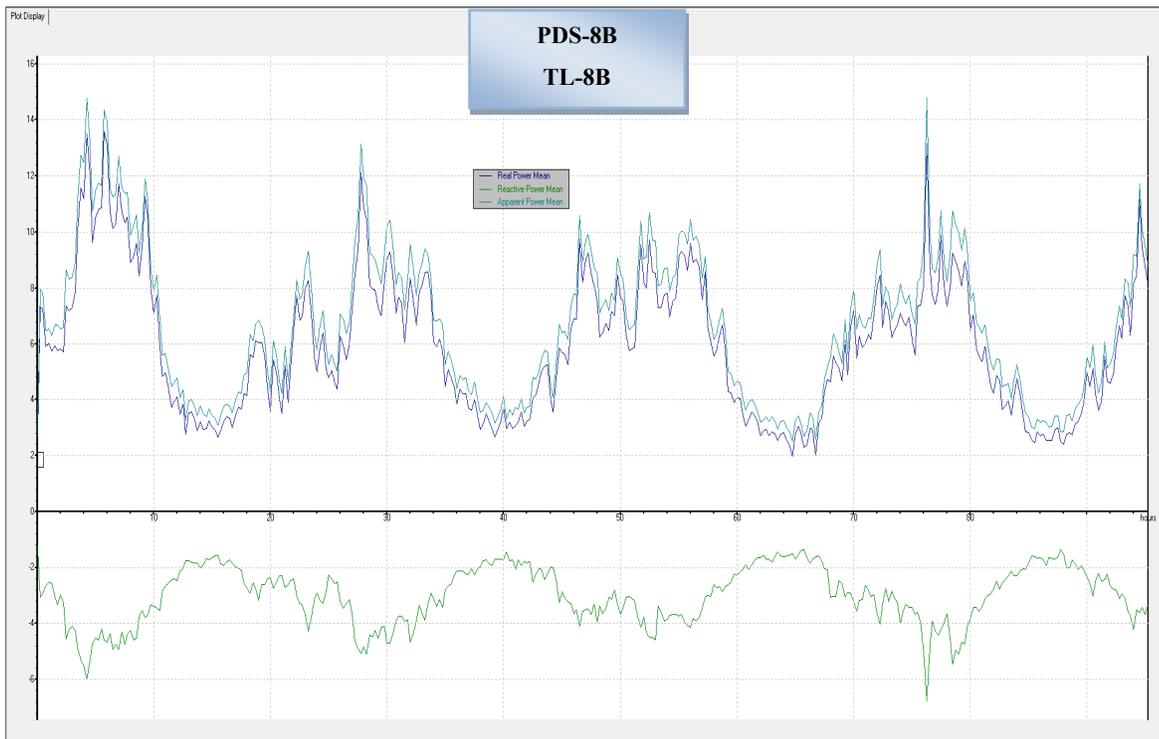


Figure 3.226 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau PDS-8B-TRANSFO TL-8B

A part la résidence PH4, nous avons mesuré aussi les transformateurs dont la puissance apparente nominale est supérieure ou égale à 100kVA installés dans la résidence PH1. Nous verrons les résultats obtenus dans le paragraphe suivant.

3.1.7 Mesure en temps réel de la charge de la résidence PH1

Pour le cas de la résidence PH1, nous avons trouvé un seul transformateur ayant une puissance apparente nominale supérieure ou égale à 100kVA. En effet, il s'agit du transformateur installé dans la salle R1-084 de la résidence PH1.

Ainsi avant de présenter les résultats des mesures en temps réel effectuées au niveau de la charge alimenté par ce transformateur, soit le tableau 3.8 qui illustre les spécifications de sa plaque signalétique.

Tableau 3.7 Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans la résidence PH1

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
RESIDENCE PH1									
R1-00084	TA BUANDERIE	DHF-0793-26690	C11279HCUX	CDTC0112VHA6XXBA	4,80%	112,5	600	208Y/120	D/y

Le transformateur TA-BUANDERIE, tel que le montre la figure 3.227 alimente la salle de buanderie de la résidence PH1. La figure 3.227 montre que le transformateur TA-BUANDERIE alimente le panneau P-A qui est installé dans la salle de Buanderie R1-130 et qui alimente évidemment les laveuses et les sècheuses installées dans cette salle.



Figure 3.227 Charge alimentée par le transformateur TA-BUANDERIE

En plus, il alimente aussi la salle de cinéma maison dans la résidence PH1, le dépanneur y compris la chambre froide, la prise TV, les prises pour ordinateur #1 et #2 de type GARRETT, l'éclairage de ce dépanneur, des toilettes et de la buanderie. Pour finir, il alimente deux démarreurs systèmes S-3 et E-5, un panneau de contrôle pour les laveuses et les

sécheuses et la machine pour que les étudiants puissent charger leurs cartes à lavage. Nous pouvons voir quelques-unes de ces charges dans la figure 3.227.

Dans ce qui suit, nous présenterons les résultats des mesures réalisées à la sortie du transformateur TA-BUANDERIE afin de voir sa consommation en temps réel.

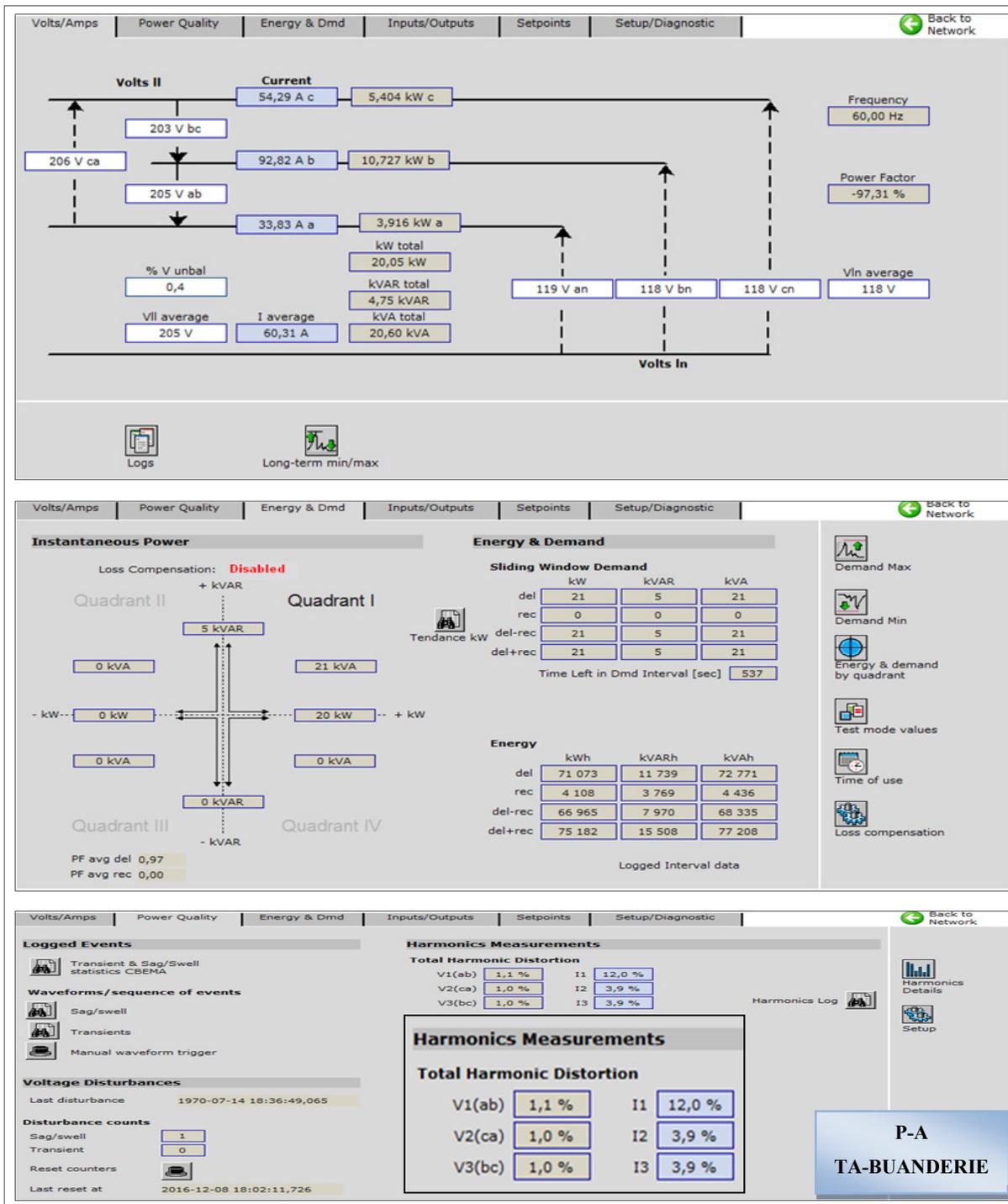


Figure 3.228 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau P-A connecté à TA-BUANDERIE

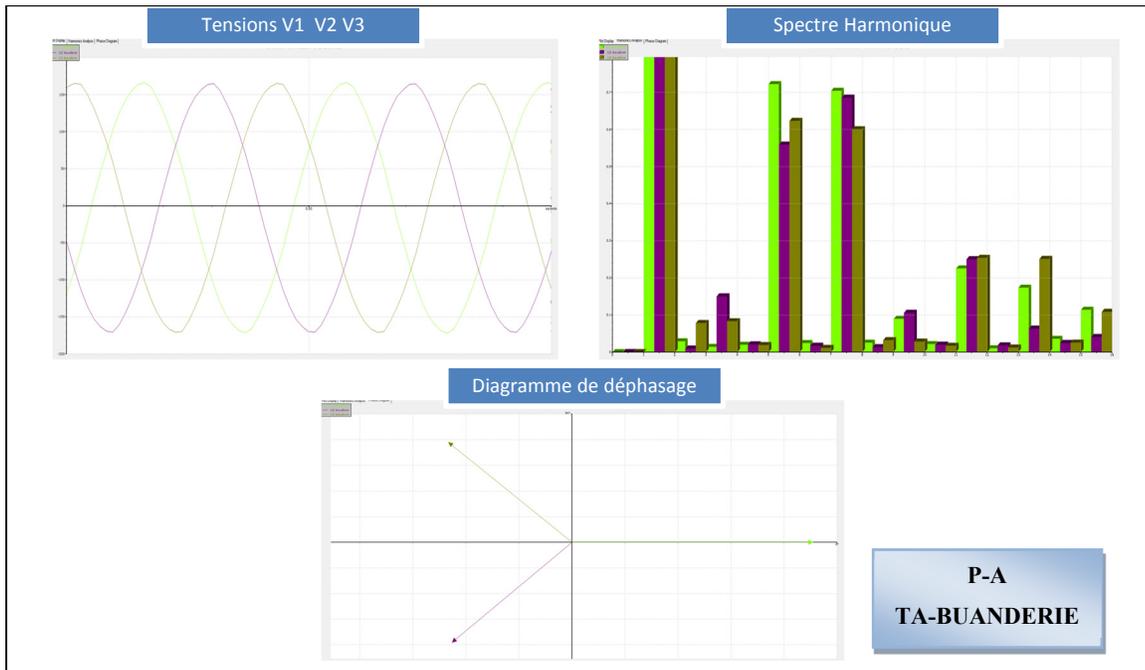


Figure 3.229 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de de la charge du panneau P-A connecté au transfo TA-BUANDERIE

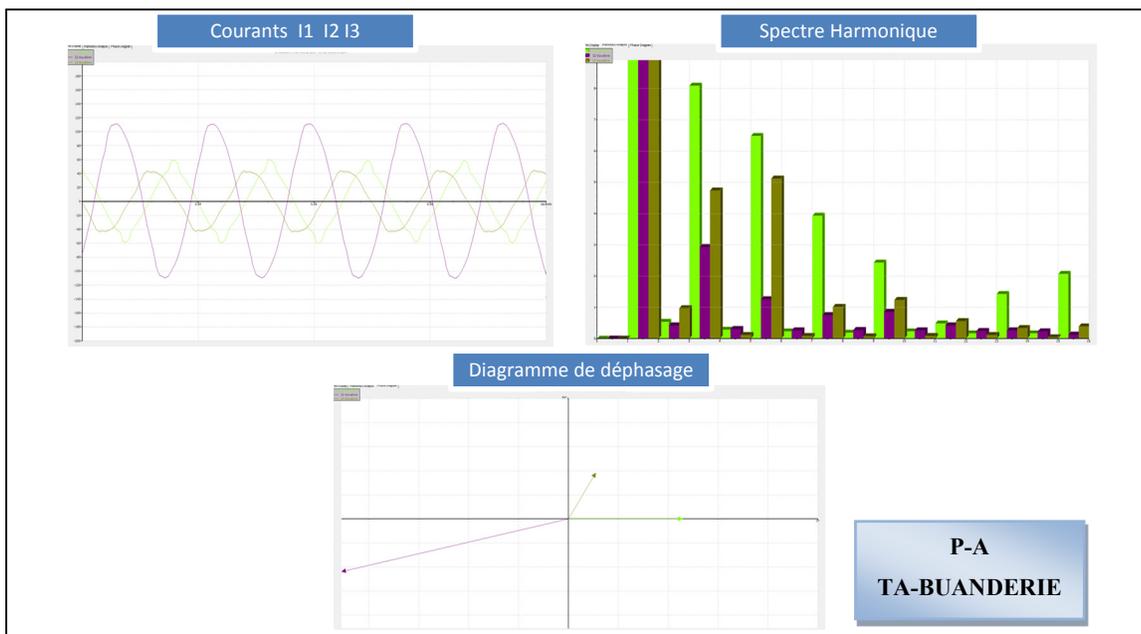


Figure 3.230 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de de la charge du panneau P-A connecté au transfo TA-BUANDERIE

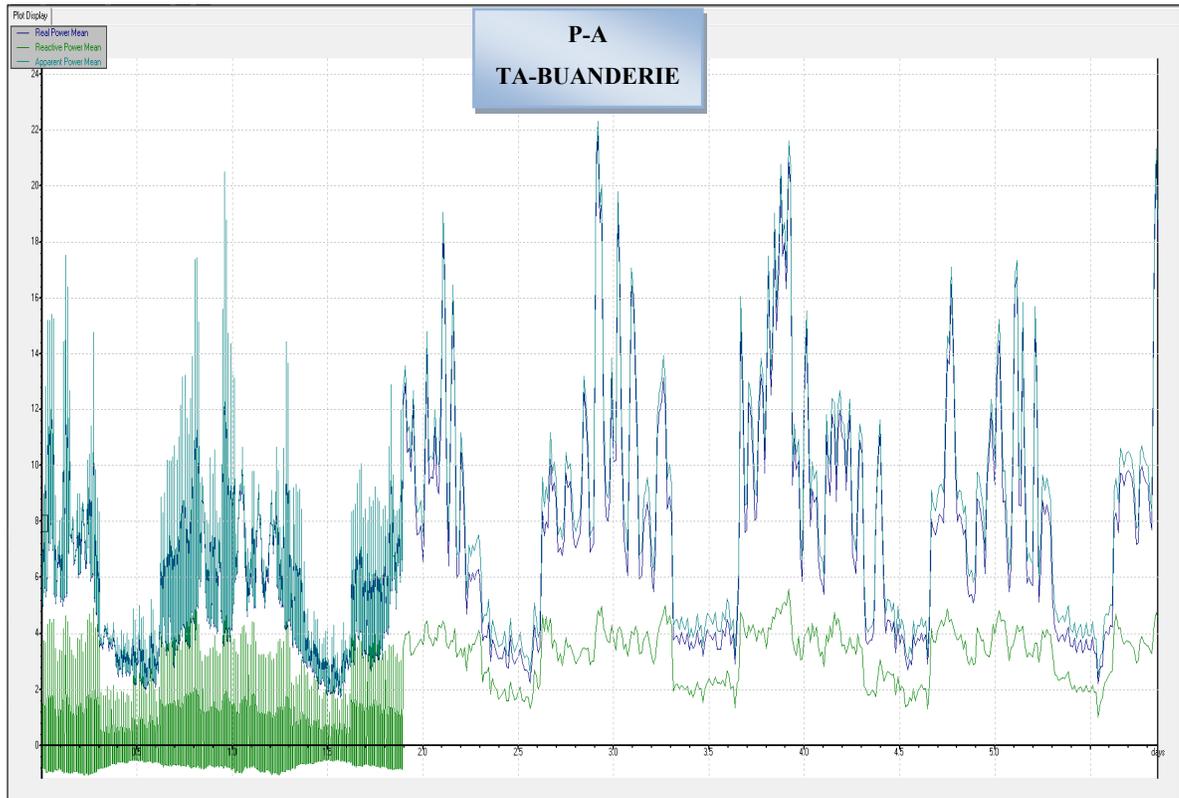


Figure 3.231 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau du panneau P-A connecté à TA-BUANDERIE

Nous clôturons nos mesures avec le pavillon carrefour d'innovation INGO qui fait partie aussi du campus ÉTS. Les mesures des charges alimentées par les transformateurs installés dans INGO et ayant une puissance apparente assez élevée seront présentées dans le paragraphe qui suit.

3.1.8 Mesure en temps réel de la charge du carrefour d'innovation INGO

Le carrefour d'innovation INGO comprend en tous douze transformateurs dont deux sont de puissances apparentes nominales supérieures à 100kVA et égales à 112.5kVA. Les spécifications des plaques signalétiques de ces deux transformateurs sont données par le tableau 3.8.

Tableau 3.8 Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le carrefour d'innovation INGO

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
INGO									
409	04-TR-401	DVC-0684-201226	VKTC0112VHA6C1BA	CDTC0112VHA6C1BA	3,42%	112,5	600	208Y/120	D/y
708	07-TR-401	DVC-0685-201226	VKTC0112VHA6C1BA	CDTC0112VHA6C1BA	3,42%	112,5	600	208Y/120	D/y

Nous avons branché les analyseurs à la sortie des deux transformateurs figurant dans le tableau ci-dessus afin de mesurer en temps réel la consommation de chaque charge alimentée par chacun de ces deux transformateurs.

Ainsi, nous avons commencé par prendre les mesures au niveau de la charge alimentée par le transformateur 04-TR-401 comme le montre la figure 3.232.

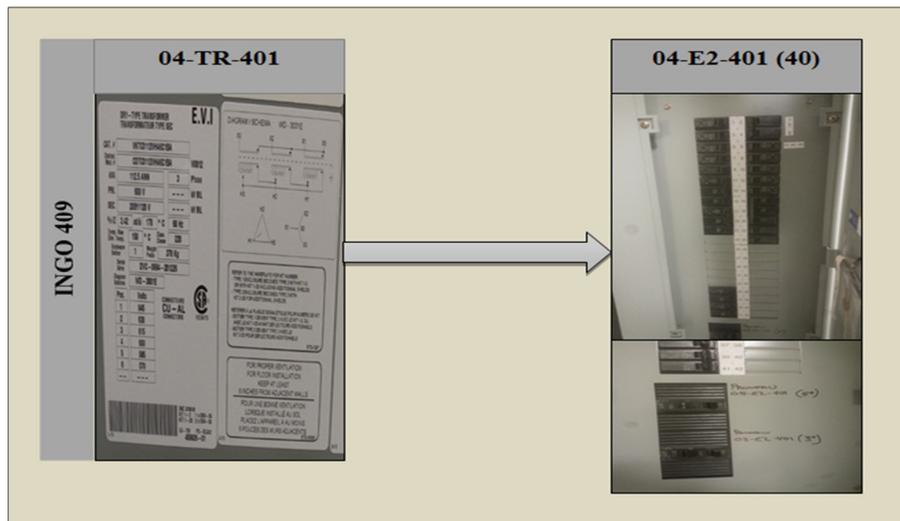


Figure 3.232 Charge alimentée par le transformateur 04-TR-401

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.232, Le transformateur 04-TR-401 alimente le panneau 04-E2-401 (40). De son côté, ce dernier alimente d'une part deux autres panneaux qui sont les panneaux 03-E2-401 et 05-E2-401 et d'autre part une thermopompe TP-407

installée dans le local 402 et une pompe de surpression PS-407 installée aussi dans le local 402.

Les résultats des mesures que nous avons obtenus au niveau du panneau 04-E2-401 (40) sont donnés par les figures 3.233, 3.234, 3.235 et 3.236.

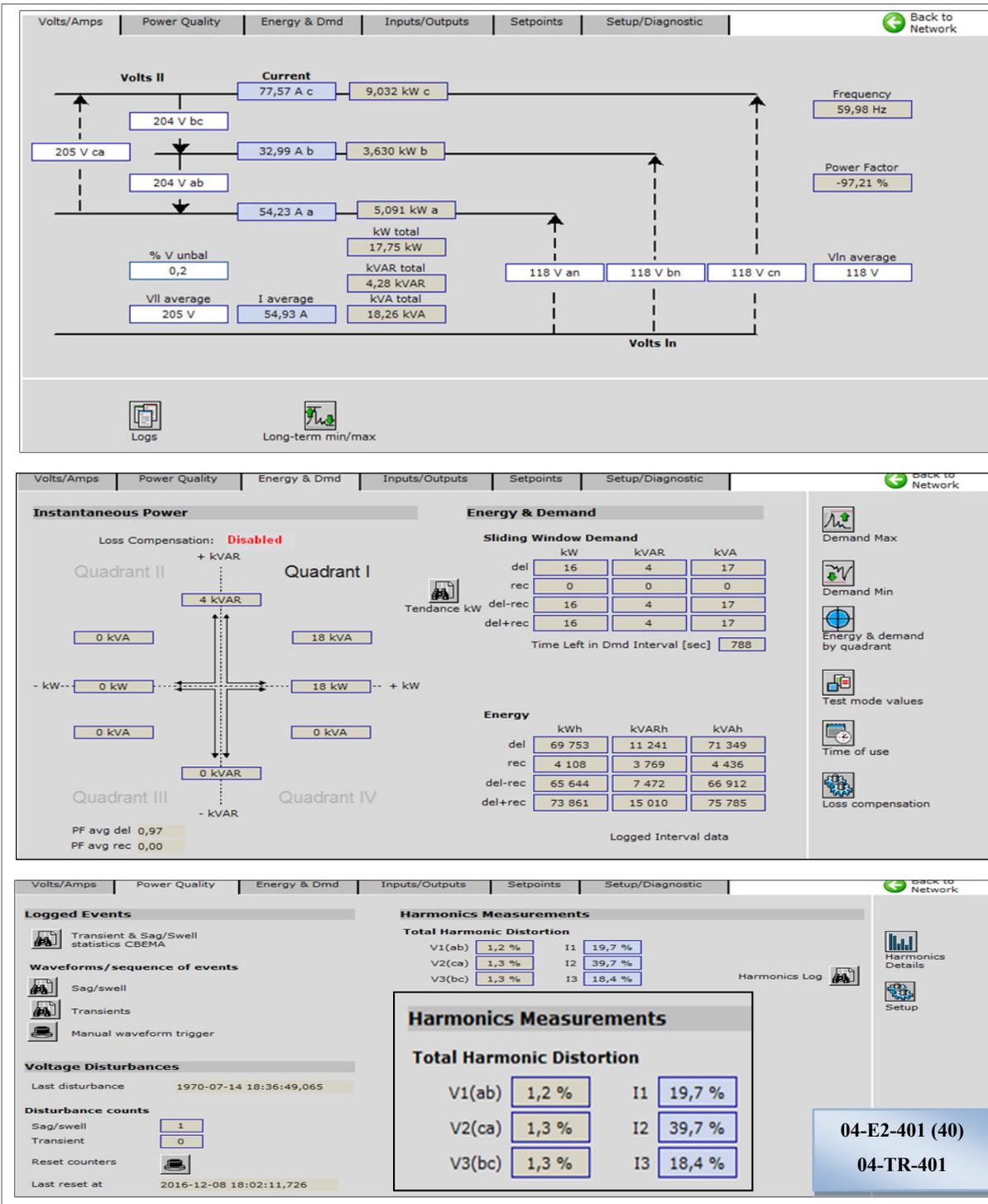


Figure 3.233 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau 04-E2-401 (40)-TRANSFO 04-TR-401

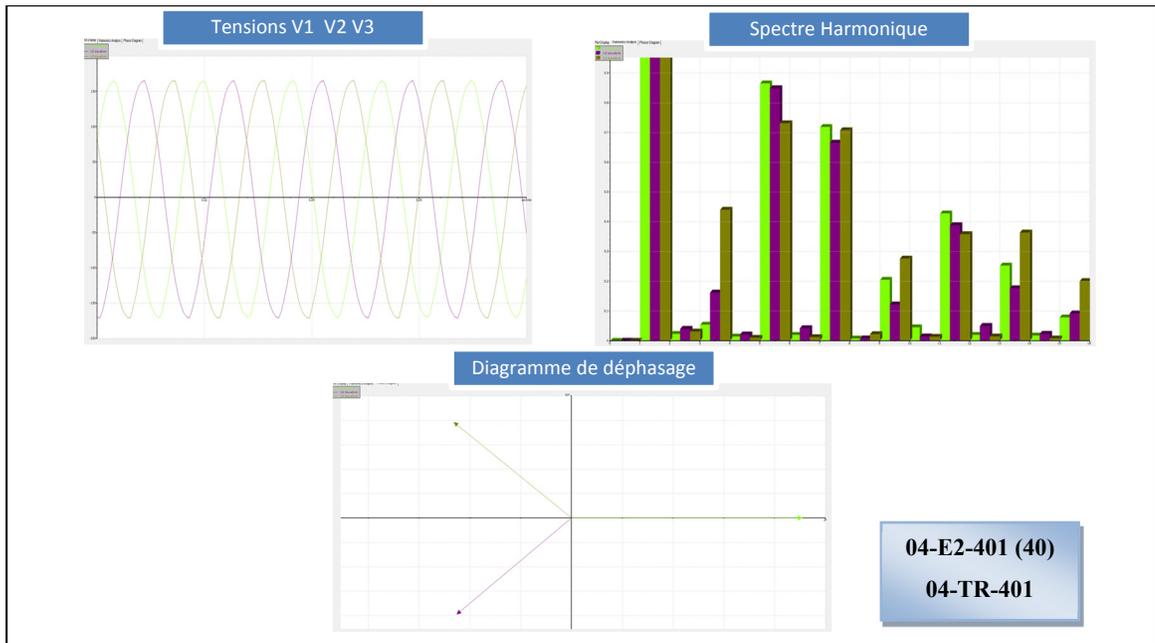


Figure 3.234 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau 04-E2-401 (40) connecté au TRANSFO 04-TR-401

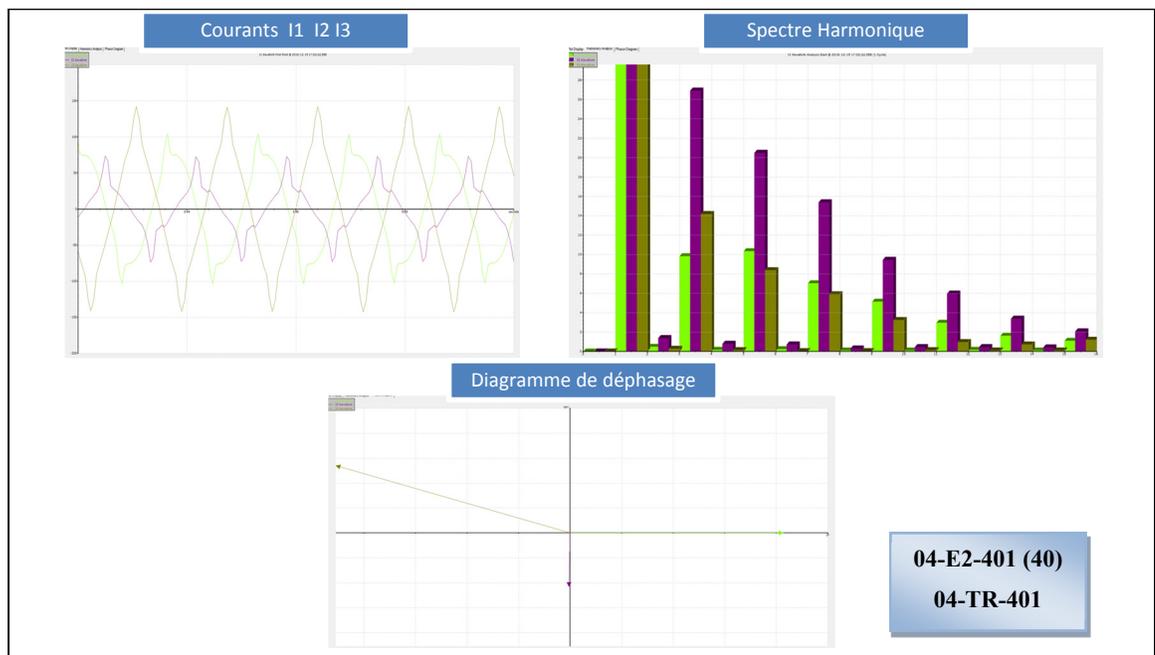


Figure 3.235 Formes d’ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau 04-E2-401 (40) connecté au TRANSFO 04-TR-401

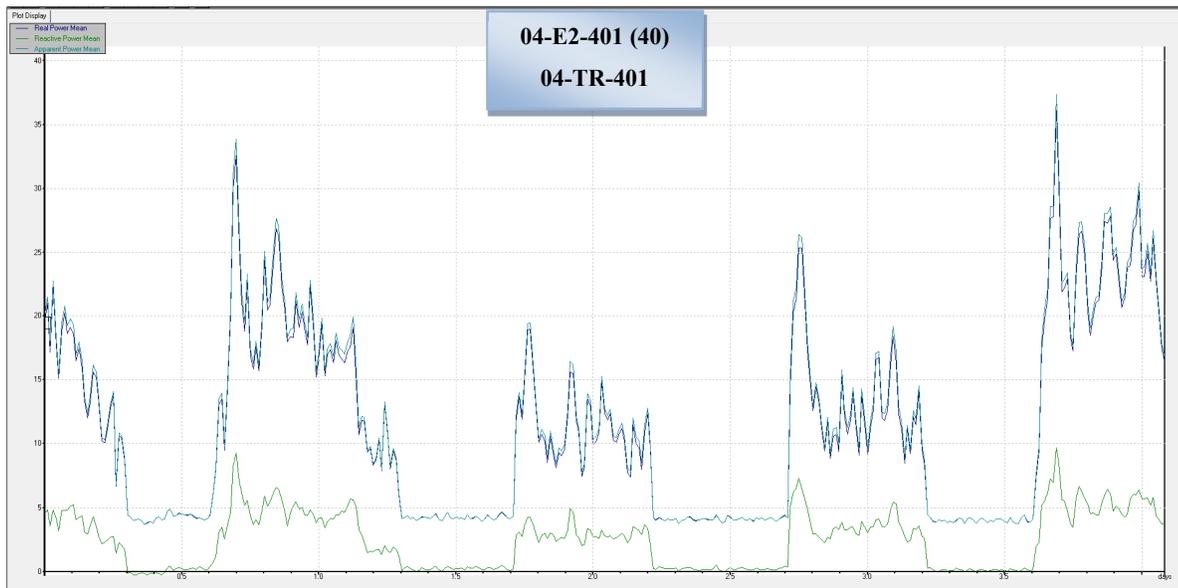


Figure 3.236 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau 04-E2-401 (40)-TRANSFO 04-TR-401

Le deuxième transformateur installé dans INGO et dont il reste à mesurer la charge s'agit du transformateur 07-TR-401.

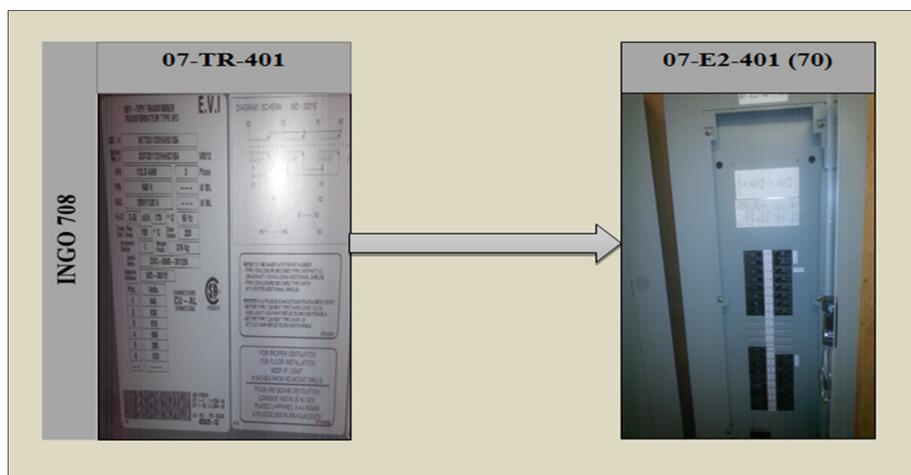


Figure 3.237 Charge alimentée par le transformateur 07-TR-401

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.237, ce transformateur alimente le panneau 07-E2-401 (70) qui alimente à son tour le panneau 06-E2-401, une thermopompe TP-410B, une deuxième thermopompe TP-410A et une pompe de surpression PS-410 qui sont toutes installées dans le local 702 d'INGO.

Les résultats des formes d'ondes des courants et des tensions, de leurs taux de distorsions harmoniques et des profils des puissances actives, réactives et apparentes que nous avons obtenus suite aux mesures en temps réel appliquées aux bornes du panneau 07-E2-401 (70) sont présentés comme suit :

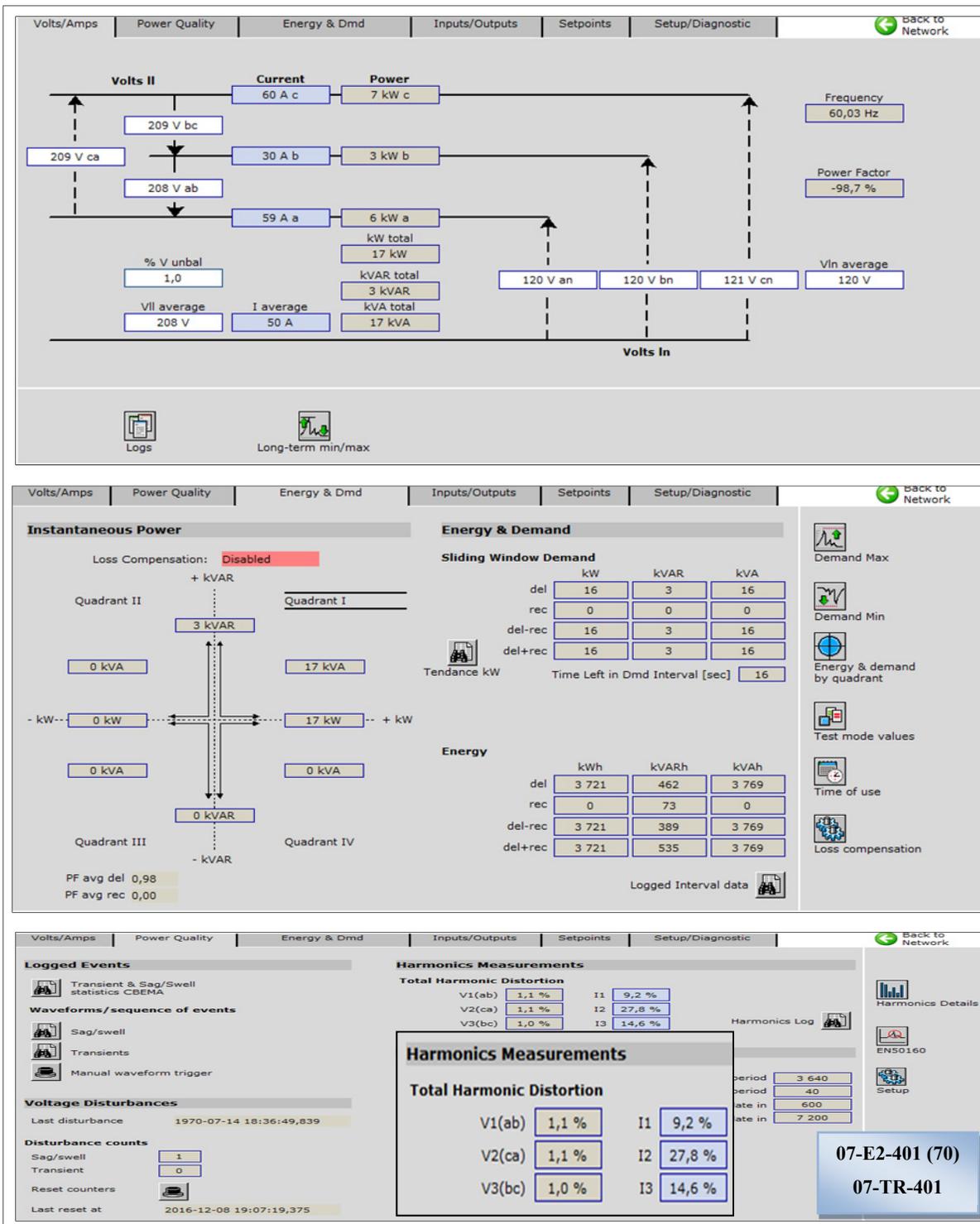


Figure 3.238 Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau du panneau 07-E2-401 (70)-TRANSFO 07-TR-401

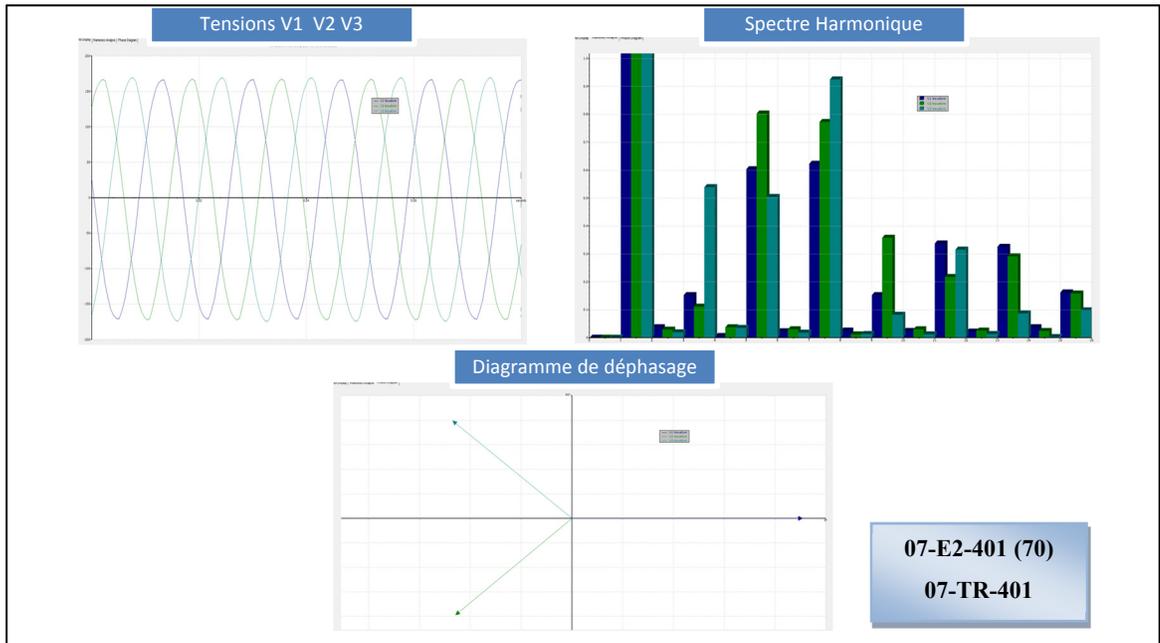


Figure 3.239 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des tensions V1 V2 V3 au niveau de la charge du panneau 07-E2-401 (70) connecté au transfo 07-TR-401

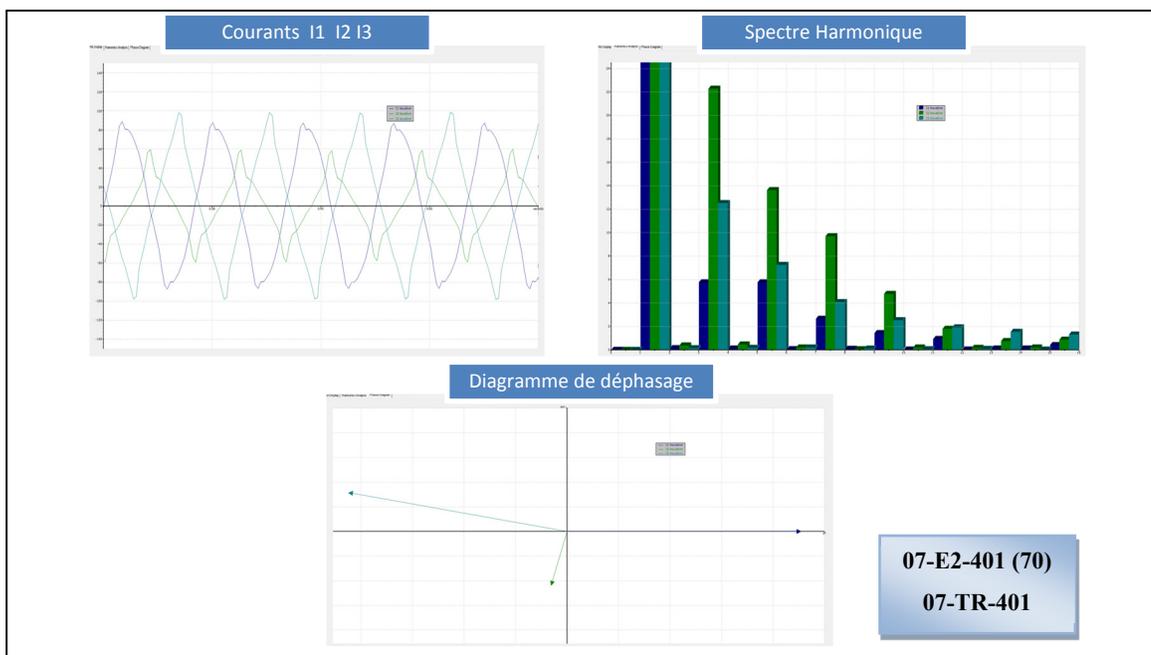


Figure 3.240 Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge du panneau 07-E2-401 (70) connecté au transfo 07-TR-401

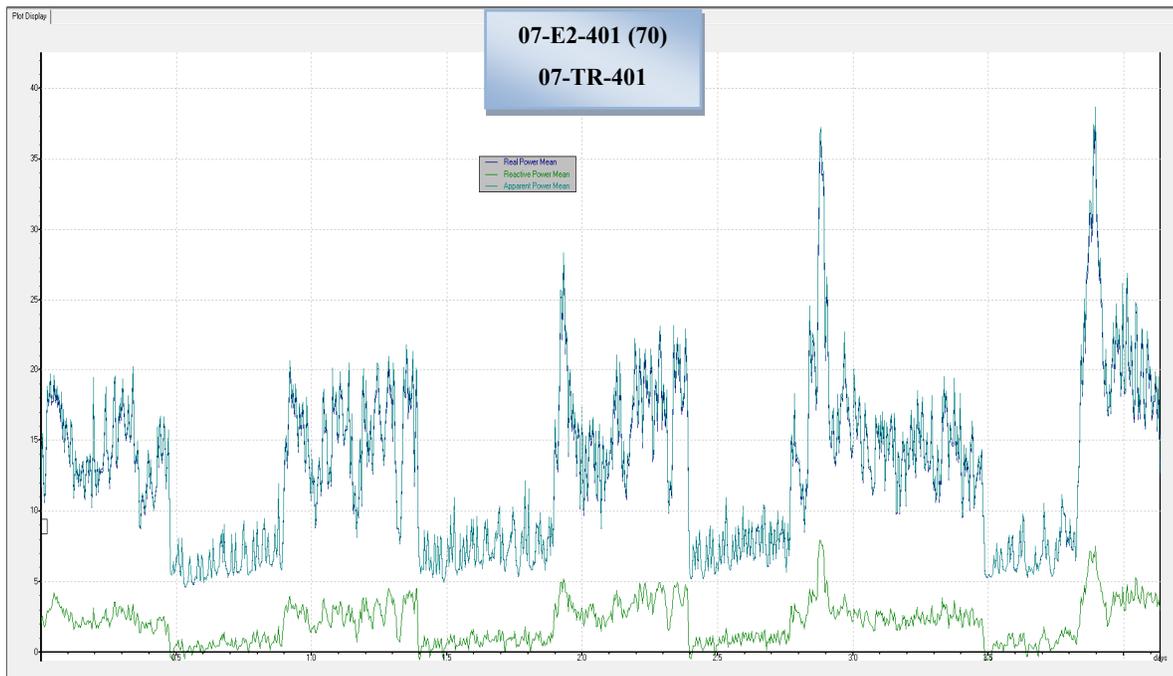


Figure 3.241 Évolution des puissances actives, réactives et apparentes au niveau de la charge du panneau 07-E2-401 (70)-TRANSFO 07-TR-401

Ainsi, Nous avons terminé avec toutes les mesures de toutes les charges alimentées par tout transformateur installé sur le réseau électrique de l'ÉTS et ayant une puissance apparente supérieure ou égale à 100kVA.

Cependant, comme nous pouvons le constater, il nous manque les mesures des charges alimentées par les transformateurs installés dans la résidence PH3 et la résidence PH2 étant donné que nous n'avons pas pu brancher nos analyseurs aux bornes de ces charges vu que y avait aucune prise réseau qui nous permettra de nous connecter et visualiser les mesures en temps réel sur l'interface Vista.

Quant au centre de technologie thermique CTT, nous n'avons pas pu mesurer la consommation en temps réel des charges qui y sont installées vu que les seules charges alimentées par les transformateurs du CTT de 100kVA et plus sont en état de repos.

Neomoin, nous avons rassemblé, comme nous l'avons fait pour les autres batiments et pavillons, les transformateurs possédant des puissances apparentes nominales supérieures ou égales à 100kVA dans deux tableaux qui suivent ; le premier tableau 3.9 représente les transformateurs installés dans la résidence PH3 et le deuxième tableau 3.10 représente ceux qui sont installés dans le centre de technologie thermique CTT.

Tableau 3.9 Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans la résidence PH3

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Modèle	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
RESIDENCE PH3									
R3-3144	03-TR-01	DVJ-0545-205747	CD1C0100VKA6XXLD	CD1C0100VKA6XXLD	4,56%	100	600	120/240	1 PH
R3-S170	SS-TR-01	DRB-0403-177220	C8CT0112VH0316000202	CD3C0112VHA6XXBB	4,90%	112,5	600	208Y/120	D/y
R3-3170	04-TR-01	DRB-0394-177220	C8CT0150VH0316000202	CD3C0150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y
R3-3172	04-TR-02	DRB-0396-177220	C8CT0150VH0316000202	CD3C0150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y
R3-9170	10-TR-01	DRB-0397-177220	C8CT0150VH0316000202	CD3C0150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y
R3-9172	10-TR-02	DRB-0395-177220	C8CT0150VH0316000202	CD3C0150VHA6XXBB	5,13%	150	600	208Y/120	D/y

Tableau 3.10 Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans la résidence PH2

Local	TRANSFO	No. de série	Modèle	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
RESIDENCE PH2								
R2-00109	TX-A	A01010S06-6	BA1100V	6,90%	100	600	120/240	1 PH
R2-00143	TX-C	A01010S06-2	BA1100V	6,90%	100	600	120/240	1 PH
	TX-B	A0052S01-2	BA1100V	6,70%	100	600	120/240	1 PH

Tableau 3.11 Liste des transformateurs de puissance apparente $S \geq 100\text{kVA}$ installés dans le centre de technologie thermique CTT

Local	TRANSFO	No. de série	No. De catalogue	Z %	S (kVA)	Tension PRIM (V)	Tension SEC (V)	couplage
CTT MUSÉE								
G-0105		211851	T211851	4,91%	112,5	460	575Y/332	D/y
R-0103	T14	0620454-SP 7359			900	600	480	D/y

Après avoir présenté dans cette première partie du chapitre 3 les résultats obtenus suite aux mesures expérimentales réalisées au niveau des différents types de charges alimentées par les transformateurs de grandes puissances qui sont installés à travers tout le campus universitaire, nous passons maintenant à la deuxième et dernière partie du chapitre 3 qui s'intéressera à simuler le réseau électrique de l'ÉTS à l'aide du logiciel de simulation MATLAB/SimPowerSystems (SPS).

3.2 Simulation du réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS avec MATLAB/SimPowerSystems (SPS)

Dans un premier temps, nous avons présenté dans le chapitre 2 les spécifications des plaques signalétiques de tous les transformateurs installés sur le réseau électrique de l'ÉTS et nous avons calculé par la suite les impédances des câbles et des transformateurs tout en s'intéressant aux transformateurs ayant une puissance apparente nominale supérieure ou égale à 100kVA.

Ensuite, dans la première partie du chapitre 3 et grâce à l'interface Vista Powerlogic, nous avons pu mesurer en temps réel la consommation de toutes les charges alimentées par ces transformateurs de grandes puissances, ce qui a permis d'avoir une meilleure idée sur la consommation en temps réel de chaque pavillon ou bâtiment qui constitue le campus universitaire de l'ÉTS.

Ainsi, dans cette dernière partie du chapitre 3, nous allons utiliser d'une part les données de calculs d'impédances des câbles et des transformateurs réalisés dans le chapitre 2, et d'autre part les données de mesures en temps réels de toutes les charges alimentées par les transformateurs de 100kVA et plus et nous allons intégrer ces données par la suite dans la simulation du réseau électrique du campus universitaire avec MATLAB/SimPowerSystems (SPS).

Pour pouvoir simuler le réseau électrique de l'ÉTS, il faut tout d'abord savoir quel transformateur alimente quelle charge, ce que nous avons pu le savoir grâce à la visite effectuée avec le technicien au début de ce travail dans le chapitre 2, puisque les plans électriques n'étaient pas suffisants. En effet, d'un côté parce qu'ils ne sont pas mis à jour étant donné que plusieurs transformateurs ne figurent même pas sur ces plans que dire alors des charges qu'ils alimentent. D'un autre côté, parce que même si ces transformateurs sont bien présents dans les plans électriques, ces derniers ne montrent pas grande chose puisque tout ce que nous pouvons voir c'est des panneaux électriques mais aucune information sur ce que ces panneaux alimentent ou quel type de charge sont connectées à ces panneaux-là.

D'où le besoin et l'importance de la visite effectuée sur place avec le technicien, au cours de laquelle nous avons pris des photos des panneaux électriques, des différentes pancartes que comportent ces panneaux, et quand c'était possible de la charge réellement connectée à ces panneaux. Ensuite, nous avons présenté ces photos dans la première partie du chapitre 3, tout en détaillant ce que nous avons pu récolter comme informations à partir de ces photos.

Ces informations vont permettre de bien choisir les blocs que nous allons utiliser pour simuler le réseau électrique avec MATLAB/SimPowerSystems (SPS) dans ce chapitre. En plus des panneaux, nous avons aussi pris des photos des plaques signalétiques des transformateurs puisque nous rappelons que nous avons listé les spécifications de ces transformateurs dans le chapitre 2 où nous avons aussi expliqué comment nous avons calculé les impédances des transformateurs et en particulier ceux qui possèdent une puissance apparente nominale supérieure ou égale à 100kVA, les résultats de ce calcul vont servir à satisfaire les paramètres qu'il faut insérer dans les blocs de transformateurs dans SimPowerSystems (SPS). En plus des paramètres des blocs des transformateurs qu'il faut avoir, nous avons aussi besoin d'insérer les valeurs des paramètres des blocs SimPowerSystems (SPS) représentant les câbles, et pour cela nous avons besoin du calcul des impédances de ces câbles, y compris les parties résistives et inductives, effectué dans le chapitre 2.

Mais il faut rappeler que ce calcul n'a aussi été possible que grâce à la visite de tout le campus, puisqu'il a fallu estimer les longueurs des câbles, et la meilleure façon d'avoir des estimations les plus précises possibles et proches de la réalité, était d'aller sur place au niveau de chaque local où chaque transformateur et charge connectée à celui-ci sont installés, et ce pour tous les bâtiments et pavillons constituant le campus universitaire de l'ÉTS.

Pour finir avec la simulation du réseau électrique de tout le campus universitaire de l'ÉTS, nous avons pensé à importer tous les résultats de mesures effectuées en temps réel avec l'interface Vista Powerlocic de Schneider Electric, et les intégrer par la suite dans MATLAB/SimPowerSystems (SPS). Cela permettra d'avoir une plateforme du réseau électrique étudié qui traduit la réalité des choses puisque nous allons pouvoir visualiser des données obtenues suite à des mesures expérimentales réalisées en temps réel, au lieu de nous contenter d'une simple simulation qui se limite à des données parfaitement théoriques.

Nous présenterons dans ce qui suit les blocs utilisés dans SimPowerSystems (SPS) pour constituer le réseau électrique du campus de l'ÉTS afin d'avoir une sorte de petite maquette qui représente le mieux et le plus proche possible de la réalité l'intégralité de ce réseau.

3.2.1 Bloc SimPowerSystems (SPS) pour les câbles

Pour représenter les différents câbles connectant tout le réseau électrique de l'ÉTS avec tous ses constituants essentiellement les transformateurs et les charges alimentée par ces derniers, nous avons utilisé le bloc SimPowerSystems (SPS) nommé Three-phase PI Section Line s'il s'agissait d'une charge et transformateur triphasés et PI Section Line s'il s'agissait d'un transformateur et charge monophasés ; les deux types de blocs SimPowerSystems (SPS) utilisés pour chaque cas sont représentés par la figure 3.242 :

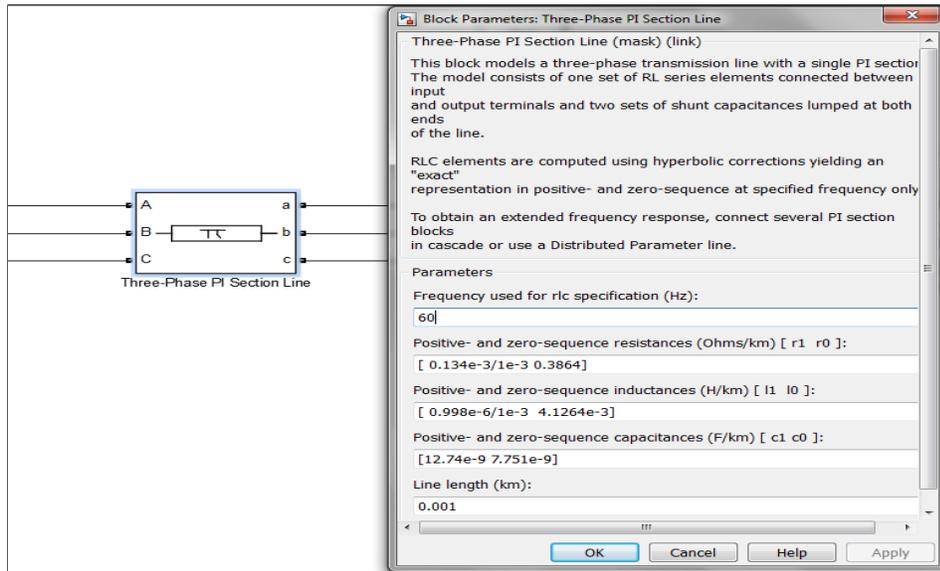


Figure 3.242 Bloc de SimPowerSystems (SPS) modélisant les câbles

Comme le montre la figure 3.242, il faut définir plusieurs paramètres pour ce bloc PI Section Line pour les deux types de systèmes ; triphasé ou monophasé. Parmi ces paramètres nous mentionnons la fréquence, la longueur du câble, ainsi que la partie résistive, inductive et capacitive de l'impédance du câble.

Pour la fréquence, nous travaillons à une fréquence égale à 60Hz, quant aux deux parties résistive et inductive de l'impédance du câble, nous avons déjà expliqué dans le chapitre 2 tout en donnant un exemple, comment les calculer donc il suffit juste d'insérer les valeurs obtenues pour chaque câble tel que nous allons nous intéresser uniquement aux câbles faisant intervenir les transformateurs ayant une puissance apparente nominale supérieure ou égale à 100kVA.

Par contre, il faut faire attention et diviser les valeurs obtenues des impédances résistives et inductives par la valeur de la longueur du câble considéré, puisque comme nous pouvons le voir sur le bloc PI, la valeur de la partie résistive de l'impédance d'un câble qu'il faut insérer doit être exprimée en ohm par mètre (Ω/m). Et du côté de la partie inductive de l'impédance

du même câble, dont il faut aussi insérer la valeur dans le bloc PI Section Line, elle doit être exprimée en henry par mètre (H/m).

Quant à la partie capacitive de l'impédance, nous n'allons pas nous intéresser à effectuer le calcul de celle-ci puisque l'effet capacitif est négligeable sauf dans les applications à haute fréquence, ce qui n'est pas le cas pour ce travail. Même chose pour l'effet homopolaire.

3.2.2 Bloc SimPowerSystems (SPS) pour les transformateurs

Pour pouvoir modéliser un transformateur dans SimPowerSystems (SPS), il faut définir certains paramètres comme, la puissance apparente nominale du transformateur en volt Ampère (VA), la fréquence en hertz (Hz), les valeurs efficaces des tensions (V_{rms}) du primaire et secondaire du transformateur, les impédances résistives et inductives du primaire et du secondaire du transformateur et il ne faut pas oublier le type de couplage du primaire et du secondaire du transformateur. Quant au reste des paramètres comme la résistance et inductance de magnétisation, les caractéristiques de saturation et les flux initiaux, nous allons négliger aussi leurs calculs.

Le choix du bloc de SimPowerSystems (SPS) utilisé pour les transformateurs dépend aussi du système dans lequel nous opérons, c'est à dire monophasé ou triphasé et dépend du type du transformateur par exemple si nous travaillons avec un transformateur de type zigzag, il faut choisir le bloc nommé Zigzag Phase-Shifting Transformer.

Pour tous les autres paramètres mentionnés précédemment, il suffit de se référer au tableau 2.1 défini au début du deuxième chapitre ou aux autres tableaux présentés par pavillons dans le chapitre 3, étant donné que ces tableaux listent les différentes données qu'il faut insérer dans les blocs des transformateurs comme les tensions primaires et secondaires, les puissance apparentes nominales, le type de couplage et les impédances en pourcentage (%) différents.

D'autre part, il est possible de se référer aussi à la méthode de calcul présentée par le paragraphe 2.2.2 du chapitre 2 et qui montre comment calculer les impédances résistives et inductive en ohm à partir des impédances totales en pourcentage (%) listés par les différents tableaux mentionnés ci-dessus.

Cependant, Il faut noter que pour les valeurs des impédances inductives obtenues en ohm suite à ce calcul présenté dans le chapitre 2, il faudrait les diviser par la fréquence angulaire qui est égale à $\omega=2\pi f$ (rad/s) pour obtenir les inductances correspondantes en henry (H) afin de pouvoir l'insérer dans le bloc de SimPowerSystems (SPS) présenté comme suit :

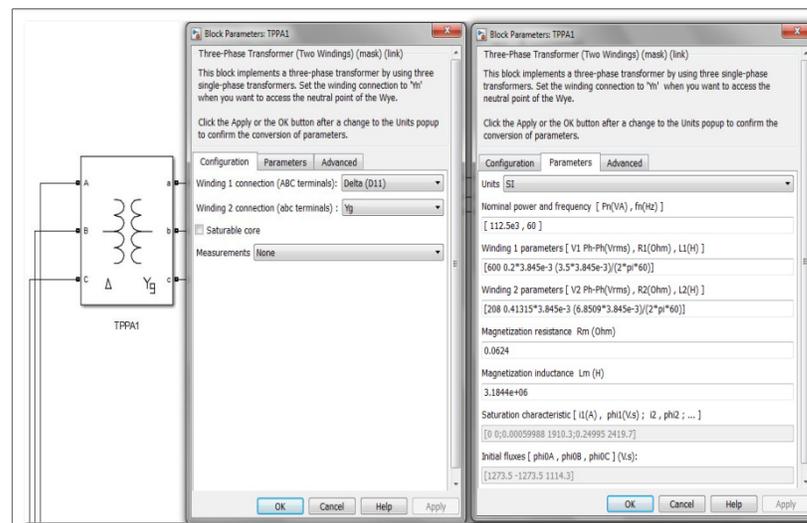


Figure 3.243 Bloc de SimPowerSystems (SPS) modélisant les transformateurs

Après avoir donné le bloc adéquat pour modéliser le transformateur et expliqué comment définir ses différents paramètres, nous proposons dans le prochain paragraphe comment modéliser les charges connectées à ces transformateurs de grandes puissances.

3.2.3 Bloc SimPowerSystems (SPS) pour les charges

Suite à la visité effectuée des différentes charges, nous avons constaté que la plupart des charges qui sont directement connectées et alimentées par les transformateurs, et au niveau desquelles nous avons branché les trois analyseurs pour réaliser nos mesures en temps réel, sont des panneaux électriques qui souvent alimentent d'autres panneaux qui alimentent à leurs tours plusieurs types de charge.

De plus, nous avons mentionné précédemment que notre but est de pouvoir simuler un réseau électrique qui traduit ce qui se passe dans la réalité et non qui se limite à ce qui se passe en théorie, et ce en ayant la possibilité de transférer les données en temps réel de consommation en termes de puissance obtenues avec l'interface Vista Powerlogic. Ainsi, le meilleur choix de bloc de SimPowerSystems (SPS) qui pourrait modéliser les différentes charges et qui pourrait répondre à tous ces critères serait le bloc nommé Three-Phase Dynamic Load représenté par la figure suivante :

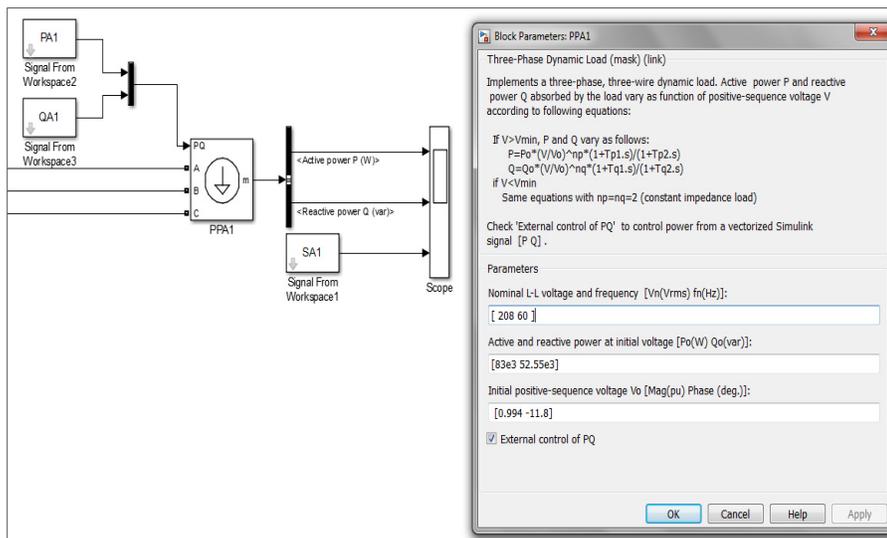


Figure 3.244 Bloc de SimPowerSystems (SPS) modélisant la charge

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.244, les paramètres qu'il faut définir sont essentiellement la tension nominale entre phases et la fréquence. Pour le reste des paramètres, comme la puissance active et réactive à la tension initiale, nous n'avons pas vraiment besoin de les définir puisque tout simplement nous allons contrôler la puissance active et réactive en cochant l'icône « External control of PQ » et en transférant par la suite les mesures des puissances actives et réactives obtenues en temps réel avec Vista Powerlogic. Ce transfert de données sera fait en utilisant des codes de MATLAB, que nous allons introduire sur des fichiers m.file ou script, et qui permettront de visualiser les courbes de puissances actives réactives et apparentes au niveau de toutes les charges mesurées en temps réel. Ces codes MATLAB seront présentés dans la suite de cette deuxième partie du chapitre 3.

3.2.4 Schéma de simulation de l'intégralité du réseau électrique de l'ÉTS

Après avoir expliqué comment modéliser les principaux composants qui constituent le réseau électrique de l'ÉTS avec leurs paramètres bien définis, il est possible maintenant de présenter le diagramme de simulation élaboré de tout le campus universitaire de l'ÉTS où nous pouvons clairement voir les différents pavillons et les transformateurs qui y sont installés avec les différentes charges qu'ils alimentent.

Notons que, dans ce schéma de simulation, nous avons présenté uniquement les transformateurs que nous avons pu mesurer en temps réel, c'est-à-dire ceux qui possèdent des puissances apparentes nominales supérieures ou égale à 100kVA et dont les charges qu'ils alimentent étaient fonctionnelles.

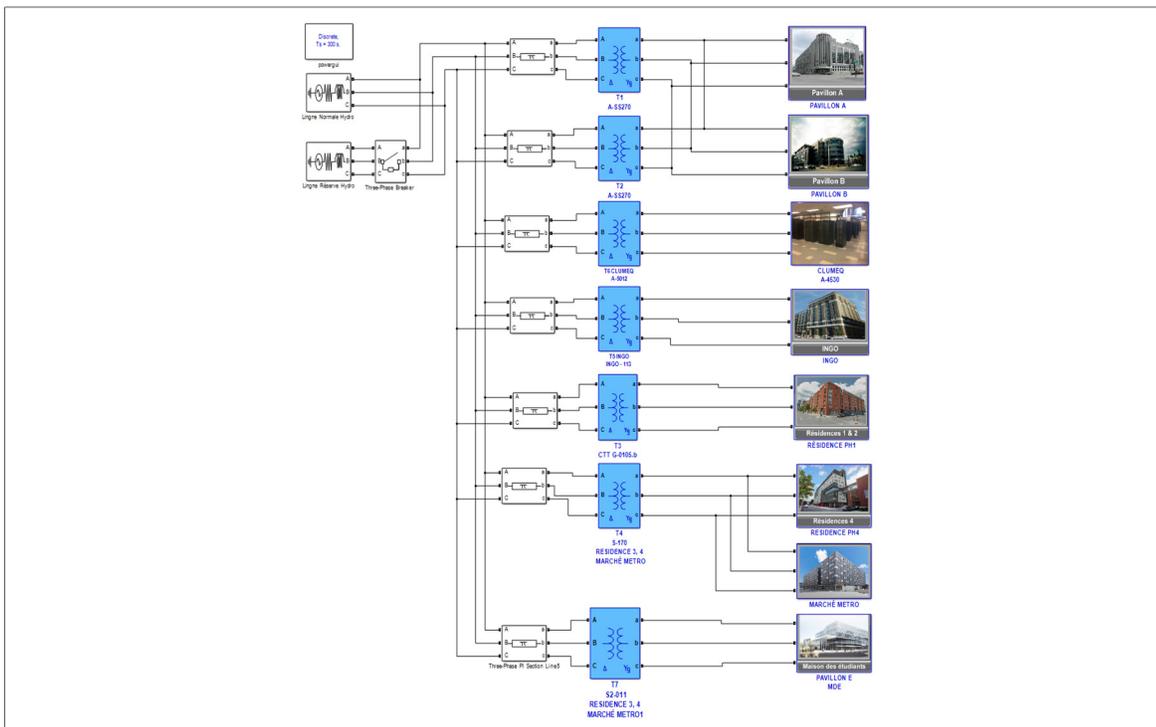


Figure 3.245 Diagramme de simulation du réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS

Comme nous pouvons le voir sur le schéma de simulation, les deux blocs SimPowerSystems des sources représentent les deux lignes d'Hydro-Québec normale et réserve, où l'impédance d'Hydro-Québec est y intégrée. De plus, nous avons présenté tous les pavillons et bâtiments qui constituent le campus universitaire tout en précisant par quel transformateur du type 25kV/600V sont alimentés.

Ensuite, chaque pavillon et bâtiment est mis en sous-système nommé aussi « Subsystem » tel que si nous cliquons dessus nous trouverons des blocs représentant tous les transformateurs par pavillon et bâtiment dont les charges étaient mesurées auparavant en temps réel dans le chapitre 3. Chaque bloc est mis pareillement sous forme de Subsystem au niveau duquel nous pouvons voir le transformateur et la charge qu'il alimente ainsi que les profils des puissances obtenus suite aux mesures en temps réel effectuées avec Vista aux bornes de ces charges. Pour donner une meilleure idée sur ces différents blocs, nous allons prendre comme exemple le carrefour d'innovation INGO tel que nous rappelons que dans ce dernier, deux transformateurs de 100kVA et plus sont installés et dont nous avons mesuré la charge en temps réel avec l'interface Vista Powerlogic. Ainsi, la figure 3.246 spécifie les deux blocs des deux transformateurs en question et le panneau que chacun il alimente.

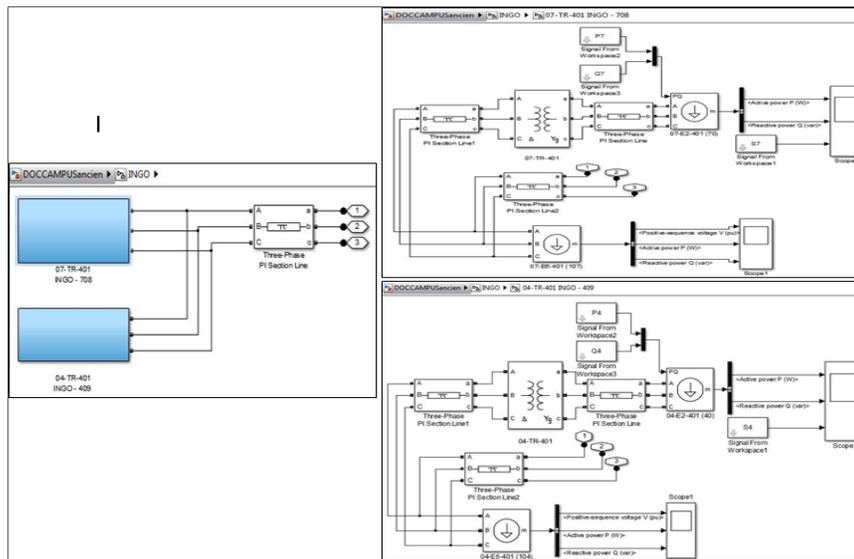


Figure 3.246 Diagramme de simulation du réseau électrique
du campus universitaire de l'ÉTS

En conclusion, le diagramme de l'intégralité de l'installation électrique présenté par la figure 3.246 nous permet dans un premier temps de simuler le réseau électrique et voir le profil de puissances en temps réel pour avoir une meilleure idée et qui est la plus proche possible de la réalité sur la consommation effective de tout le campus universitaire, et ce grâce au transfert sur le fichier MATLAB des différentes données de mesures obtenues suite à la connexion analyseur-Vista Powerlogic.

Il nous permet aussi d'avoir une sorte de plateforme qui représente le réseau électrique du campus universitaire, sur laquelle nous pourrions tester et voir l'impact de l'introduction de n'importe quel type de charge sur l'intégralité du réseau électrique actuel avant de procéder à l'installation réelle de ces charges.

Ainsi, dans ce contexte, nous allons nous intéresser à voir et tester l'impact de l'intégration d'une charge non linéaire sur l'intégralité du réseau électrique de l'ÉTS. Pour cela, nous allons continuer avec l'exemple précédent qui est le carrefour d'innovation INGO, et plus précisément le transformateur 07-TR-401 qui alimente le panneau 07-E2-401 (40) dont les

mesures en temps réel de la charge totale ont été présentées dans la première partie de ce chapitre. Dans ce cas, pour pouvoir mettre en évidence l'impact d'une charge non linéaire pour l'exemple choisi, nous allons connecter des blocs SimPowerSystems qui permettent de mesurer et visualiser les formes d'onde des tensions et des courants au niveau des trois niveaux de tensions 25kV, 600V et 208V comme le montre la figure 3.247.

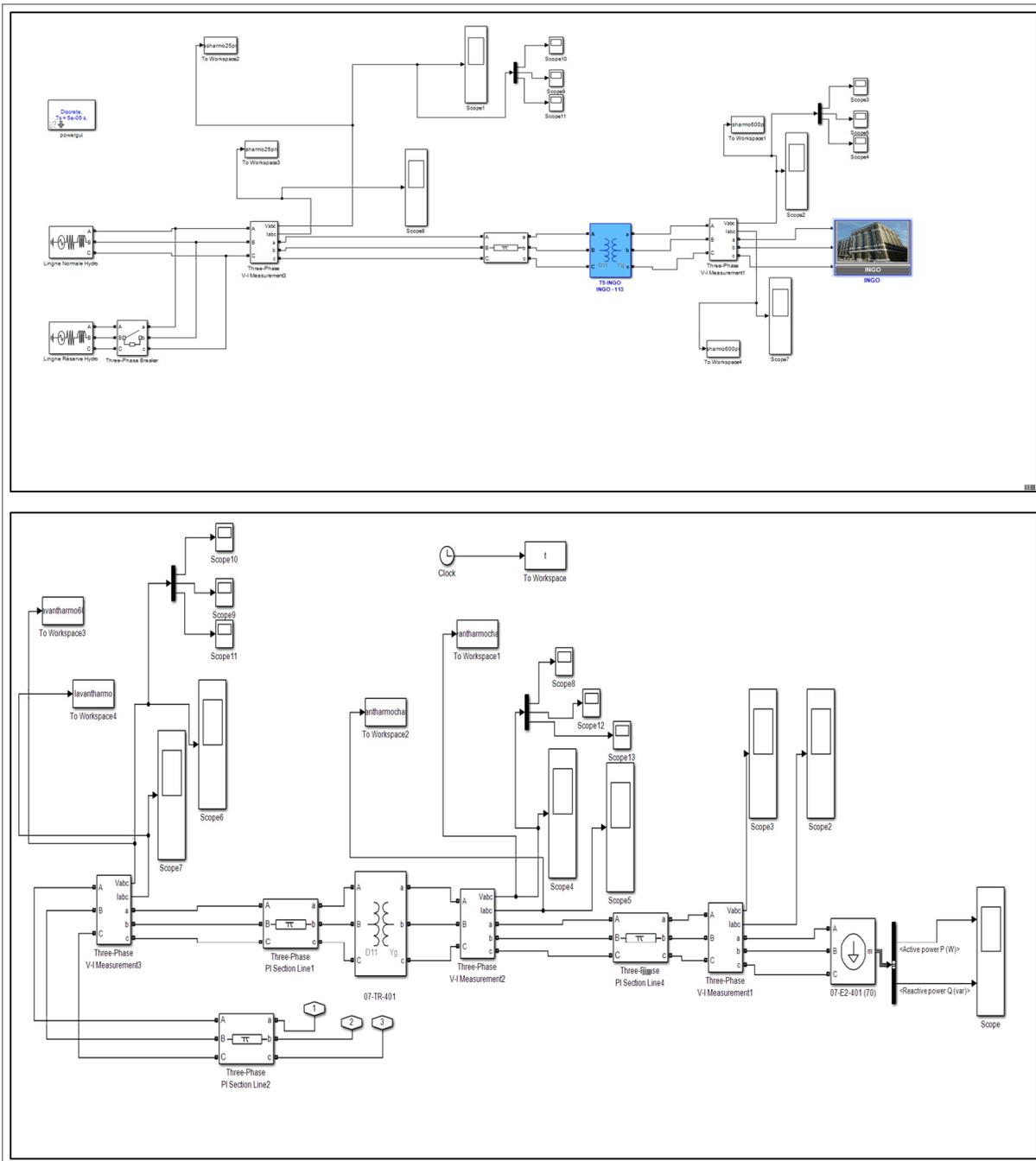


Figure 3.247 Diagramme de simulation du réseau électrique du campus avant l'intégration d'une charge non linéaire

Donc comme nous l'avons mentionné précédemment, notre but est de voir l'impact d'une charge non linéaire sur le réseau, mais plus précisément sur les formes d'onde des tensions. Pour ce faire, nous allons introduire des harmoniques de courants au niveau la charge du transformateur 07-TR-401 et ce tout en ajoutant des blocs SimPowerSystems de sources de courants dont les paramètres sont satisfaits à partir du spectre harmonique des courants de charge du panneau 07-E2-401 (40) obtenu en temps réel avec Vista Powerlogic. Cependant, pour notre cas nous allons nous limiter aux harmoniques de courants impairs d'ordre 5, 7 et 11 mais nous allons aussi introduire la fondamentale. D'où les quatre blocs SimPowerSystems de sources de courants que nous pouvons observer sur la figure 3.248.

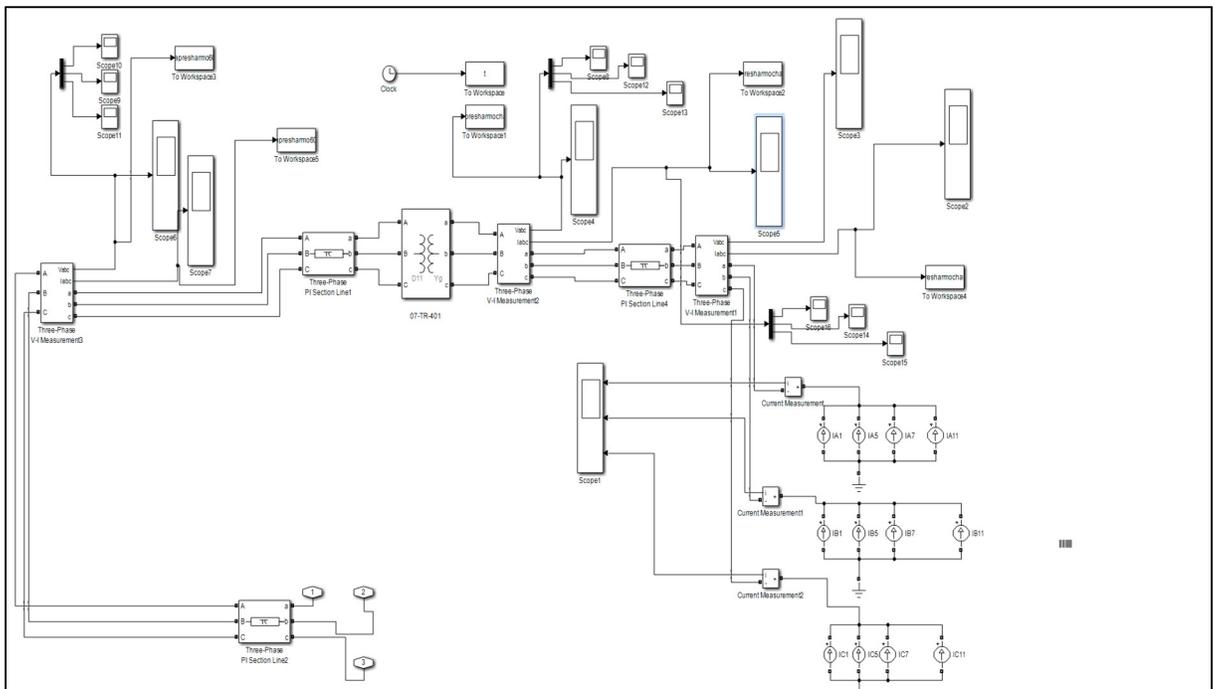


Figure 3.248 Diagramme de simulation du réseau électrique du campus avec l'intégration d'une charge non linéaire

Nous présenterons dans ce qui suit les résultats obtenus suite à la simulation du réseau électrique de l'ÉTS avant et après l'introduction des harmoniques des courants.

Parmi ces résultats, nous présentons les formes d'onde des tensions et des courants au niveau de la charge, c'est-à-dire du côté secondaire du transformateur 07-TR-401, ainsi que le taux de distorsion harmonique des courants et des tensions au niveau de la charge.

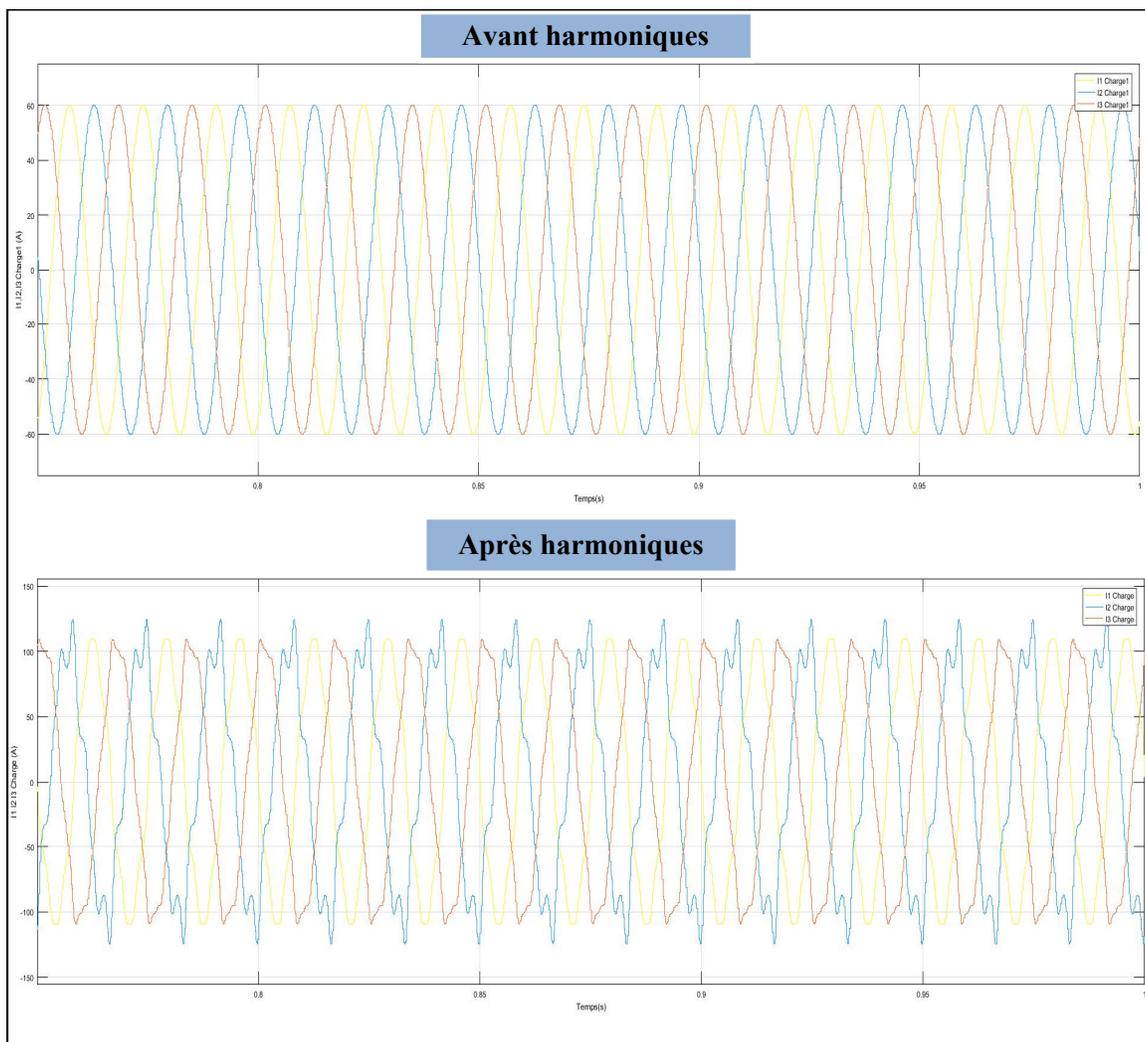


Figure 3.249 Formes d'onde des courants de charge avant et après introduction des harmoniques des courants

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.249, les formes d'onde des courants de charge, c'est-à-dire du côté secondaire du transformateur 07-TR-401, passent de formes d'onde parfaitement sinusoïdales et équilibrées à des formes d'onde avec un taux de distorsion harmonique très élevé ainsi qu'un taux de déséquilibre élevé et très prononcé côté amplitude des courants de charge, ce qui prouve l'introduction effective des harmoniques des courants sur le réseau électrique de l'ÉTS.

En plus de la visualisation des formes d'onde des courants de charge, nous allons aussi présenter dans les figures 3.250 et 3.251 les spectres harmoniques de ces courants avec une précision de leurs taux de distorsion harmonique THD avant et après l'introduction des harmoniques de courants sur le réseau électrique de l'ÉTS.

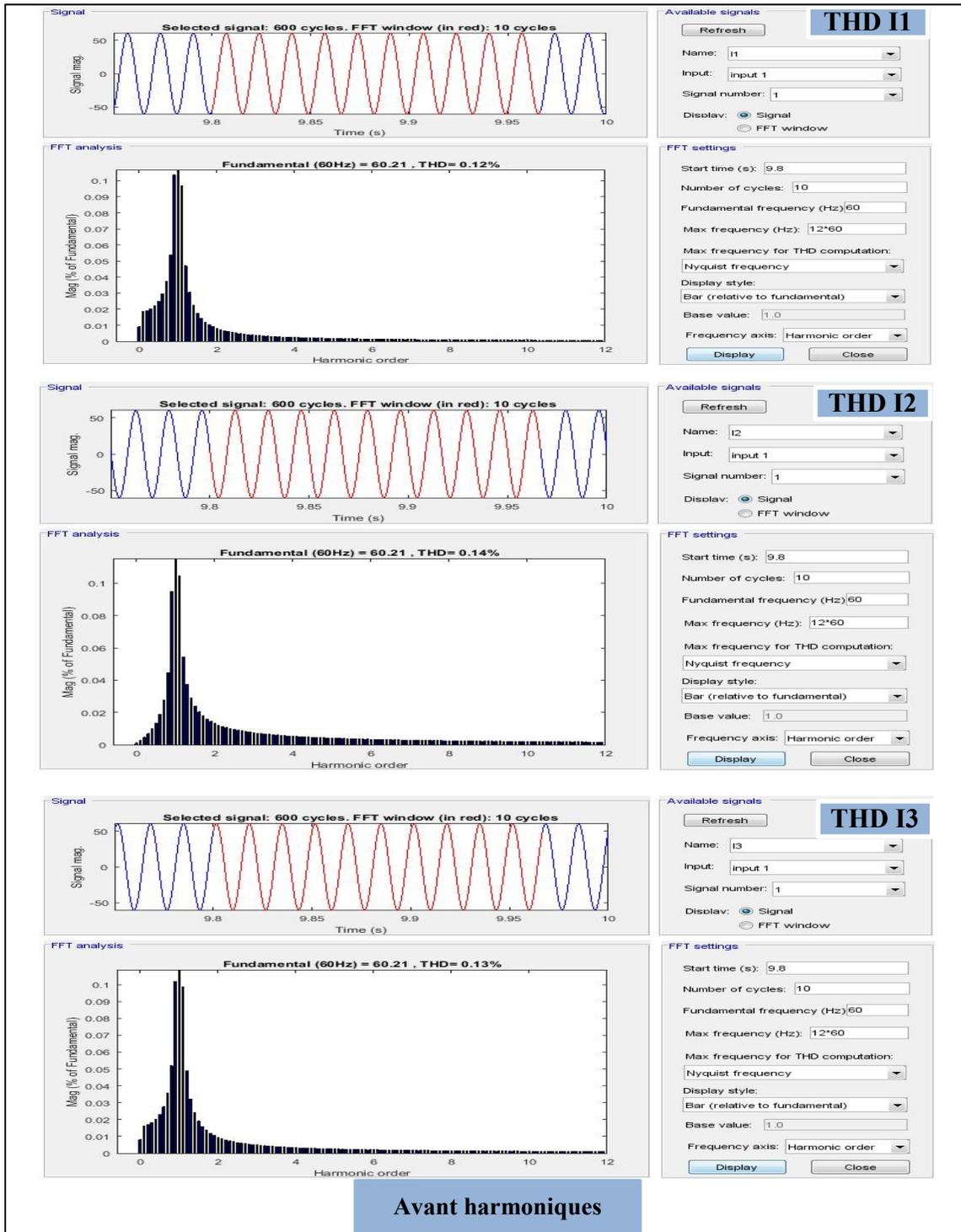


Figure 3.250 Taux de distorsion harmonique THD des courants de charge avant l'introduction des harmoniques de courants

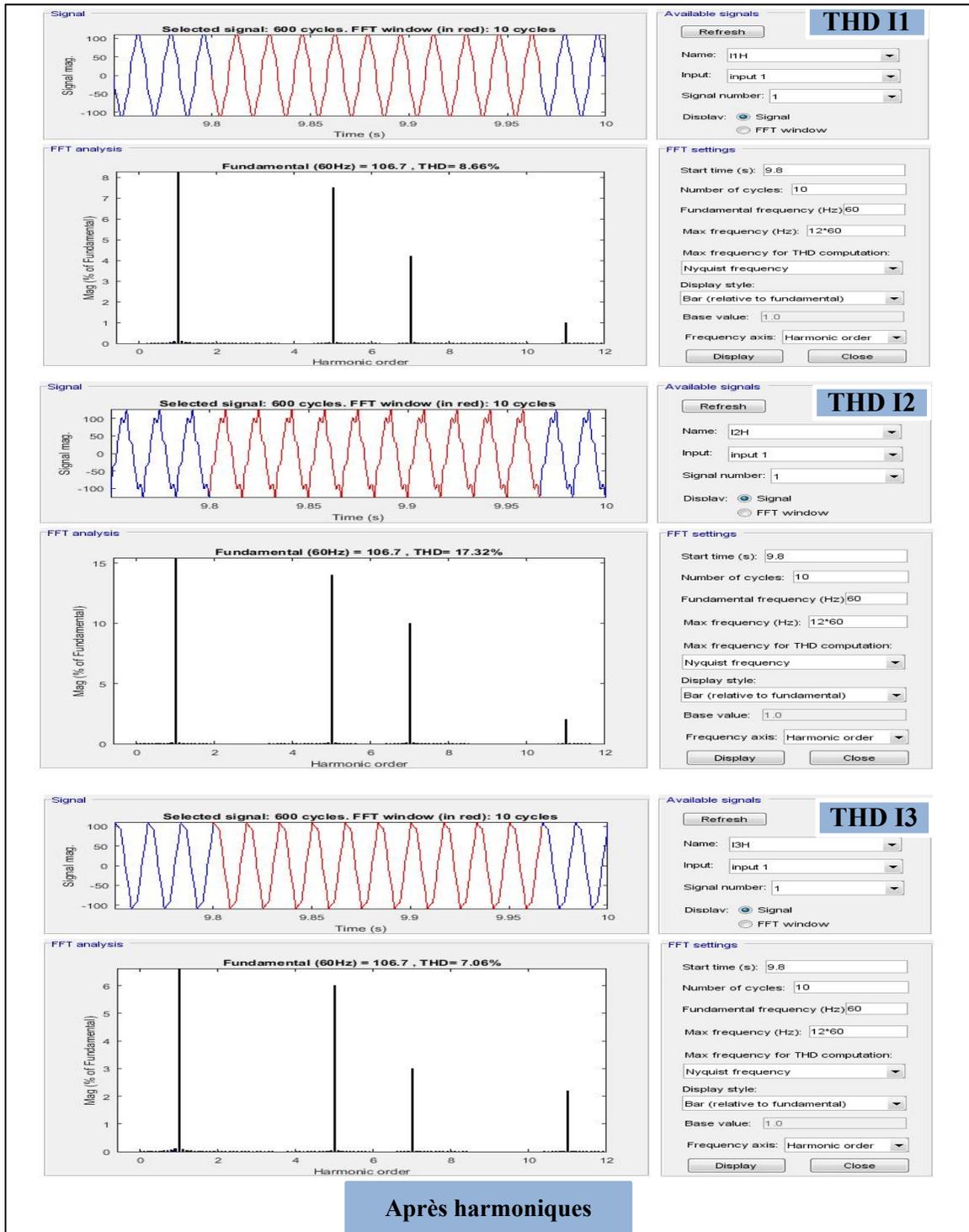


Figure 3.251 Taux de distorsion harmonique THD des courants de charge après l'introduction des harmoniques de courants

Ainsi, d'après les deux figures précédentes, nous constatons une augmentation du taux de distorsion harmonique THD des courants de charge des trois phases où le THD de I1 a augmenté de 0.12% à 8.66%, ensuite celui de I2 a aussi augmenté de 0.14% à 17.32% et cette augmentation se poursuit avec le THD de I3 qui passe de 0.13% à 7.06%.

Cependant, comme c'était mentionné précédemment, notre objectif est de tester et mettre en relief l'impact de l'introduction d'une telle charge non linéaire, avec tous ces harmoniques de courants, sur les formes d'onde des tensions, et ce aux trois niveaux de tensions 208V, 600V et 25kV. Pour cela, nous allons nous intéresser dans ce qui suit aux formes d'onde des tensions ainsi que les spectres de distorsion harmonique donnant les taux de distorsion harmonique des tensions à ces trois niveaux.

Nous commençons donc par les tensions côté secondaire du transformateur, c'est-à-dire côté charge où la tension est égale à 208V, et nous présentons dans les deux figures qui suivent les formes d'onde et le spectre harmonique des tensions de charge avant et après introduction des harmoniques.

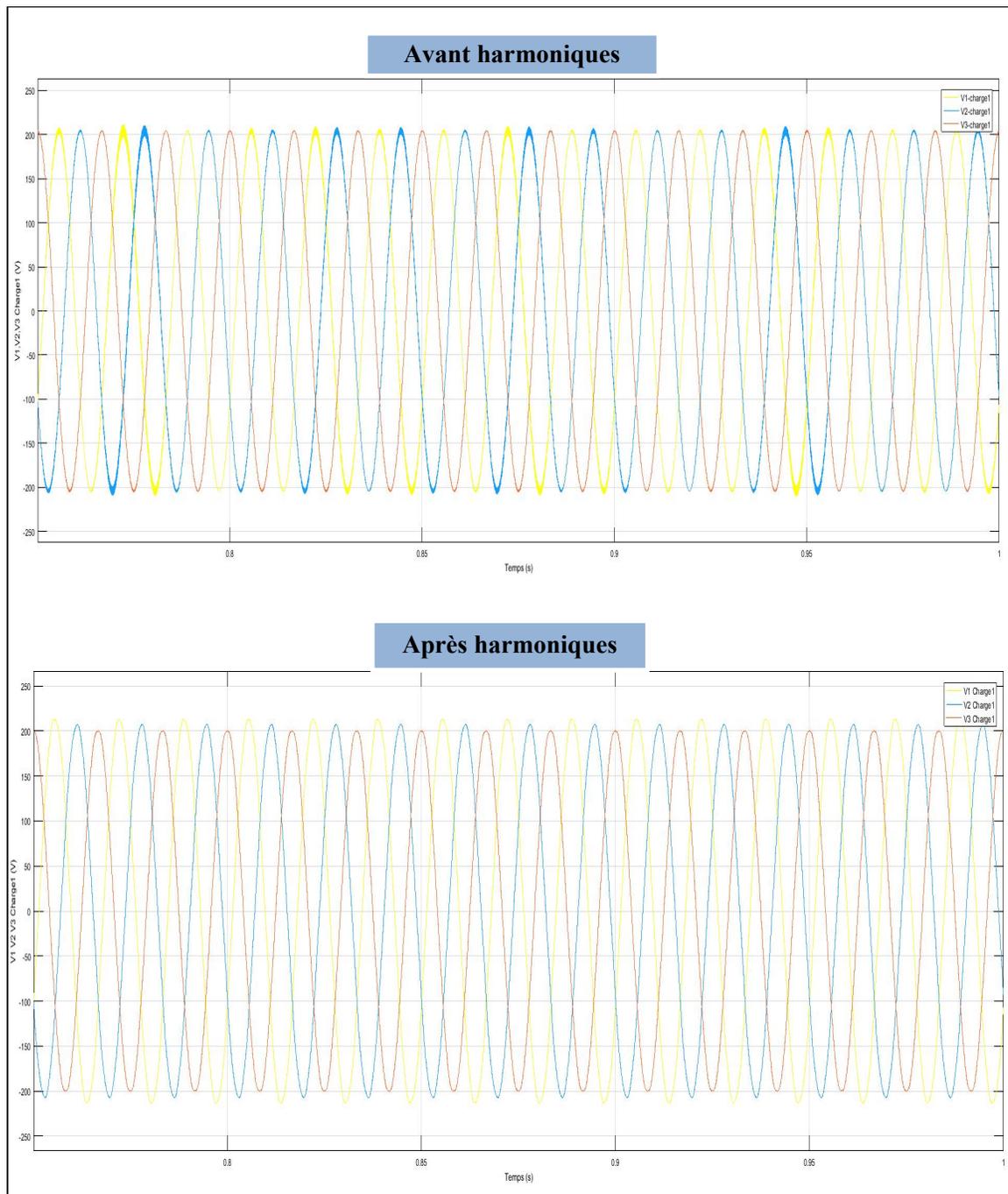


Figure 3.252 Formes d'onde des tensions de charge avant et après introduction des harmoniques des courants

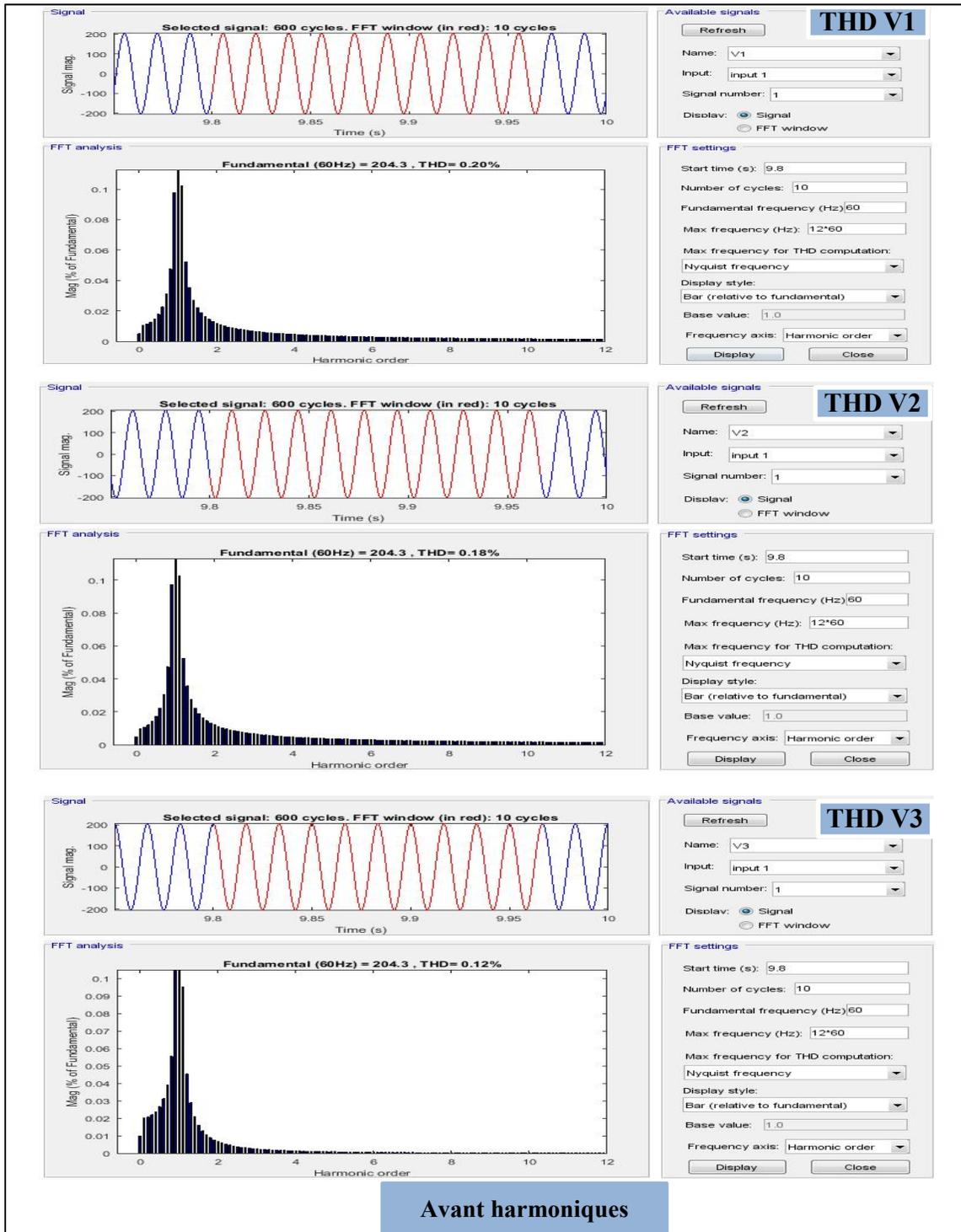


Figure 3.253 Taux de distorsion harmonique THD des tensions de charge avant l'introduction des harmoniques de courants

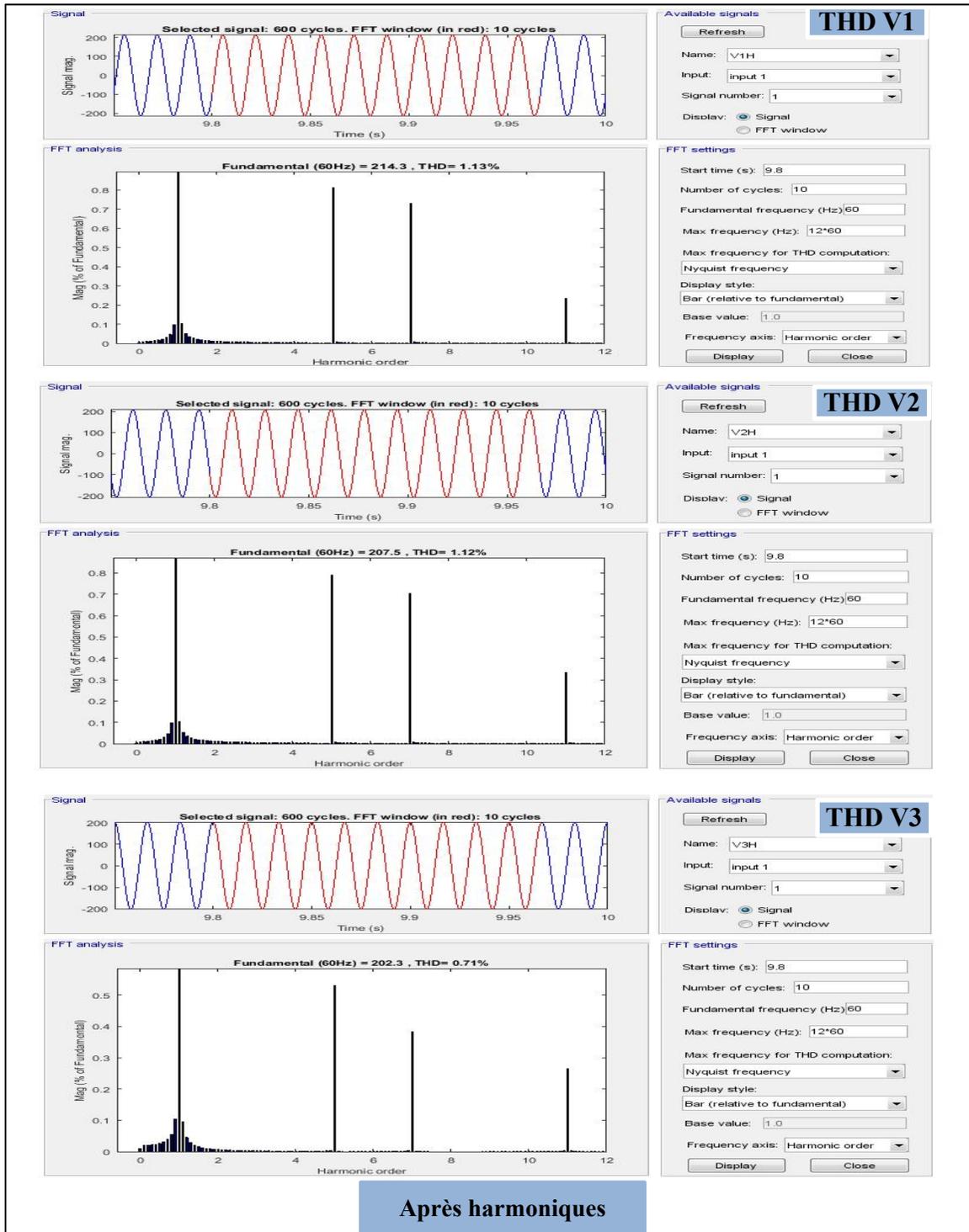


Figure 3.254 Taux de distorsion harmonique THD des tensions de charge après l'introduction des harmoniques de courants

La figure 3.252 montre que suite à l'introduction des harmoniques des courants de charge, les formes d'onde des tensions de charge subissent un déséquilibre que nous pouvons surtout constater du côté de l'amplitude de ces tensions. En effet, l'amplitude de la tension de la première phase V1 est légèrement plus grande que celle de V2 dont l'amplitude possède aussi une valeur supérieure à celle de V3.

Quant au taux de distorsion harmonique THD des tensions de charge, ils subissent une augmentation juste après l'introduction des harmoniques des courants de charge et qui se manifeste par une augmentation du THD de la tension de charge de la première phase V1 de 0.2% à 1.13%, une deuxième augmentation du THD de V2 de 0.18% à 1.12% et une troisième augmentation du THD de V3 de 0.12% à 0.71%.

Cette même analyse sera faite pour les tensions du côté primaire du transformateur 07-TR-401, autrement dit où la tension est égale à 600V. Ainsi, nous présentons pour commencer les formes d'onde et les spectres harmoniques des tensions au niveau 600V avant et après l'introduction des harmoniques des courants par les figures 3.255, 3.256 et 3.257.

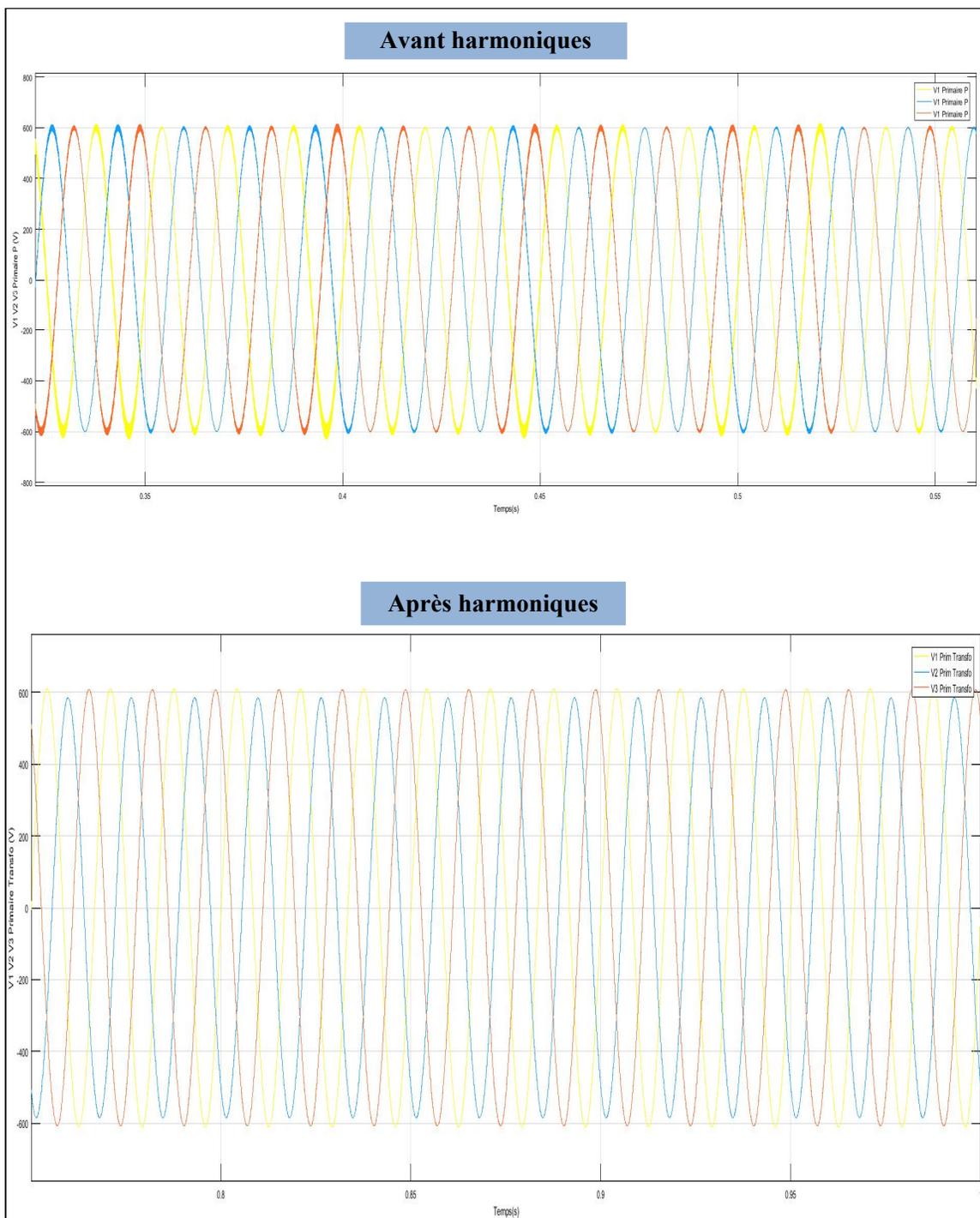


Figure 3.255 Formes d'onde des tensions au niveau du primaire du transformateur côté 600V avant et après introduction des harmoniques des courants

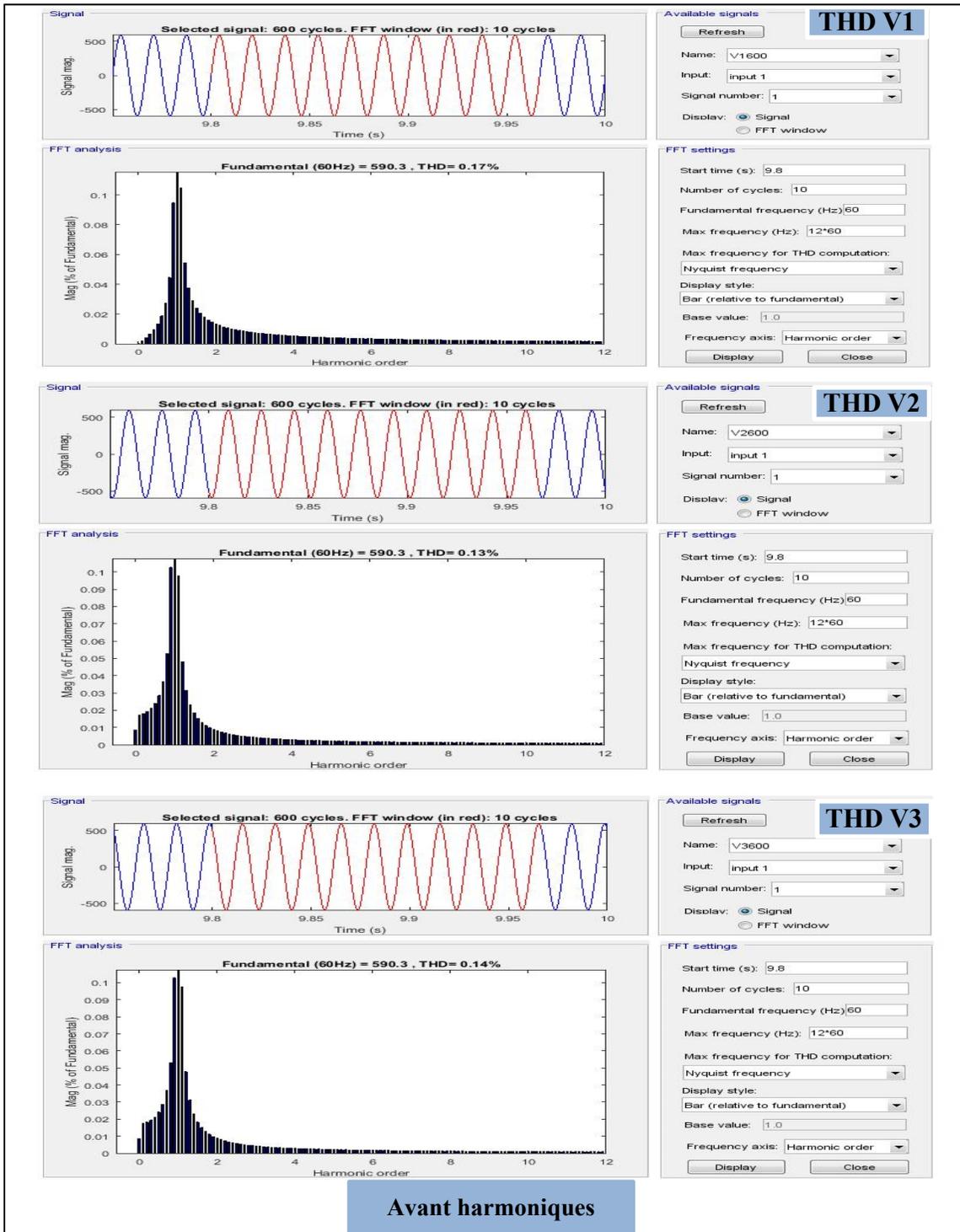


Figure 3.256 Taux de distorsion harmonique THD au niveau du primaire du transformateur côté 600V avant l'introduction des harmoniques de courants

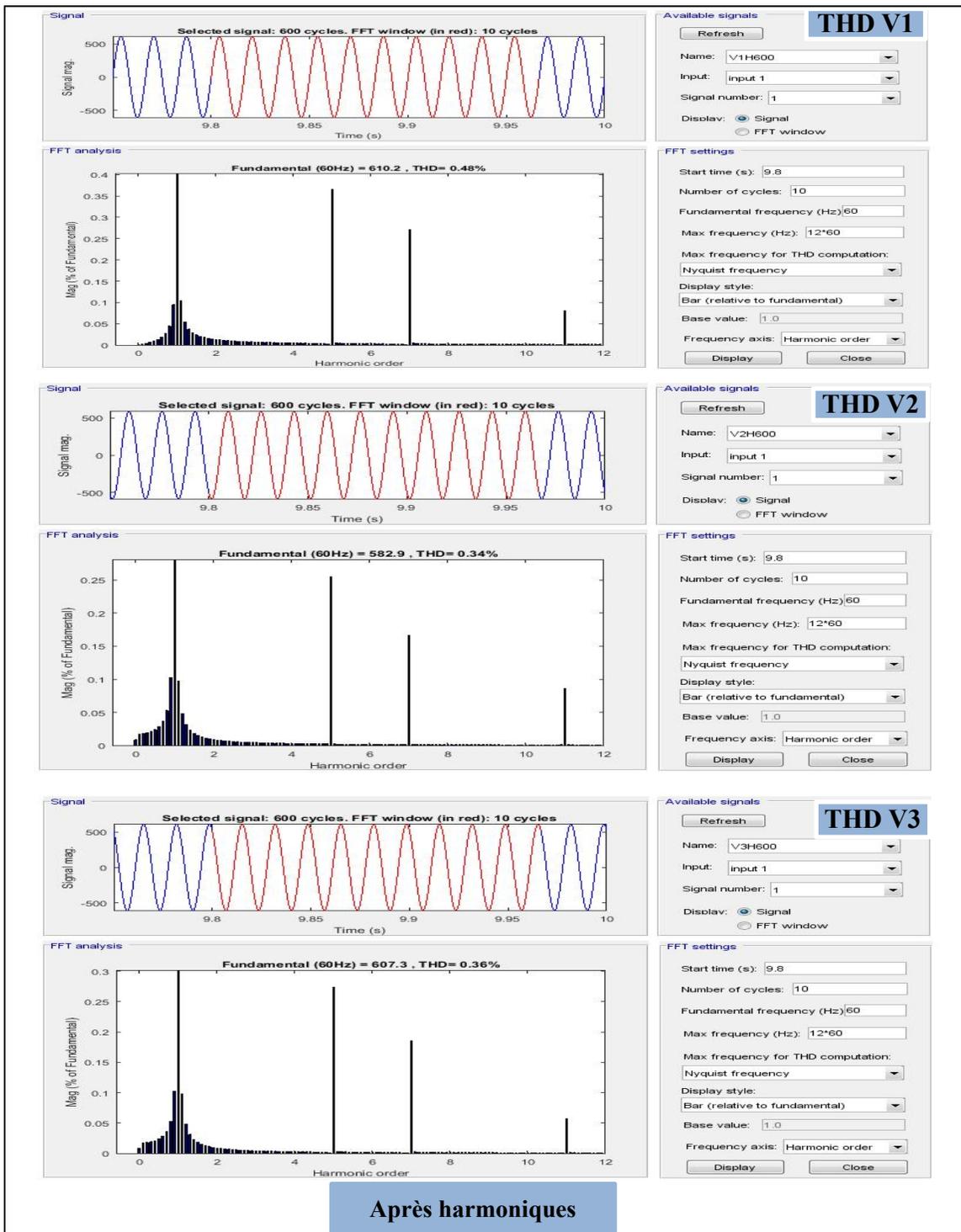


Figure 3.257 Taux de distorsion harmonique THD au niveau du primaire du transformateur côté 600V après l'introduction des harmoniques de courants

D'après la figure 3.255, il est clair que sous l'effet de l'introduction des harmoniques des courants de charge, les tensions au niveau du primaire du transformateur 07-TR-401 deviennent des tensions déséquilibrées où l'amplitude de la tension de la deuxième phase V2 est plus petite que celles de V1 et V3.

Puis, pour le taux de distorsion harmonique THD des tensions du côté 600V, il est clair aussi que les taux de distorsion harmonique des trois phases des tensions au niveau du primaire du transformateur subissent une augmentation suite à l'introduction des harmoniques des courants de charge tel que le THD de V1 augmente de 0.17% à 0.48%, le THD de V2 augmente aussi de 0.13% à 0.34% et le THD de V3 de 0.14% à 0.36%.

Nous clôturons notre étude de l'impact de l'introduction d'une charge non linéaire sur le réseau électrique de l'ÉTS par l'étude de cet impact sur les tensions au niveau de la source, c'est-à-dire du côté 25kV. Nous présentons ainsi les formes d'onde et le spectre harmonique des tensions de la source avant et après l'introduction des harmoniques des courants de charge.

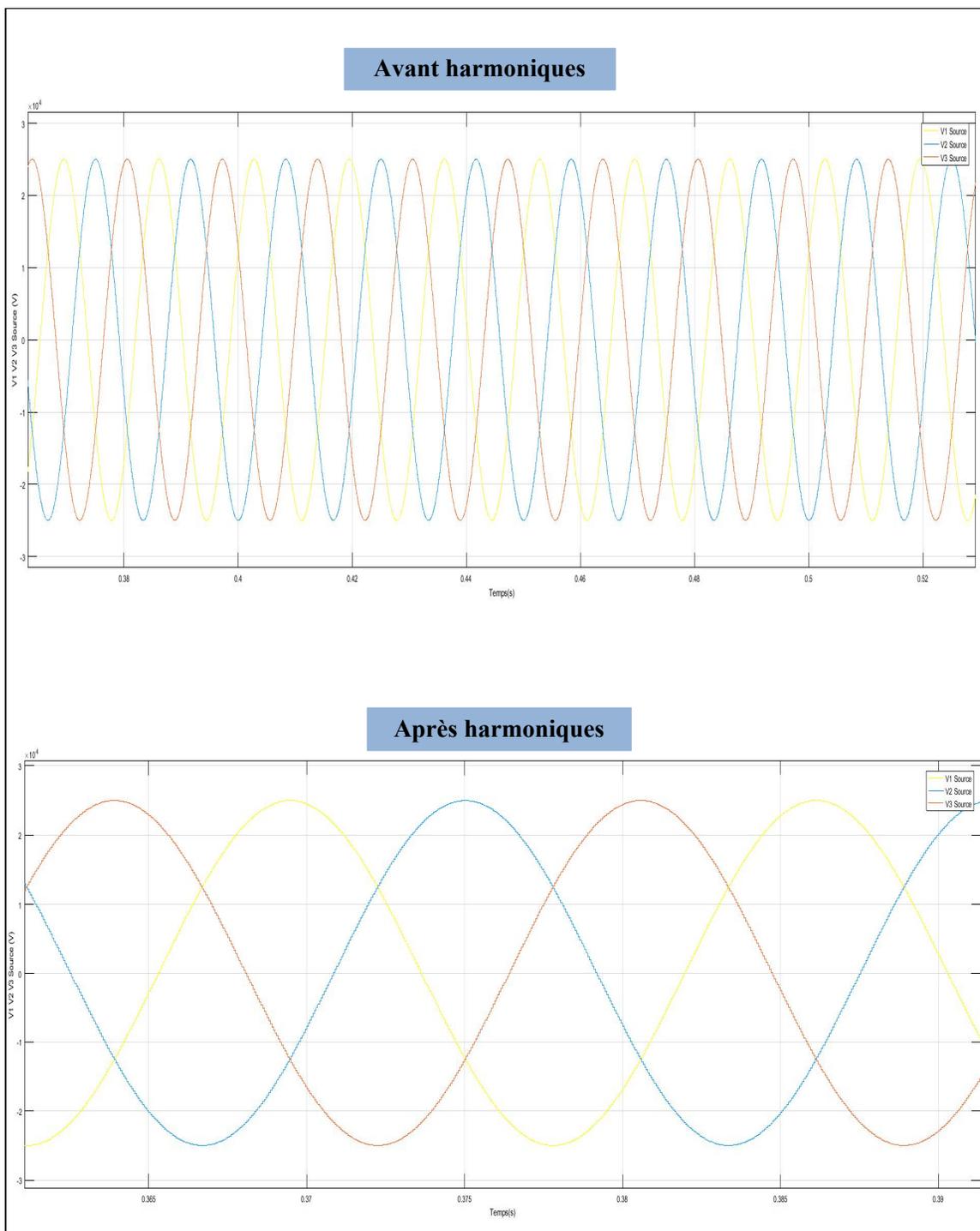


Figure 3.258 Formes d'onde des tensions au niveau de la source, du côté 25kV avant et après introduction des harmoniques des courants

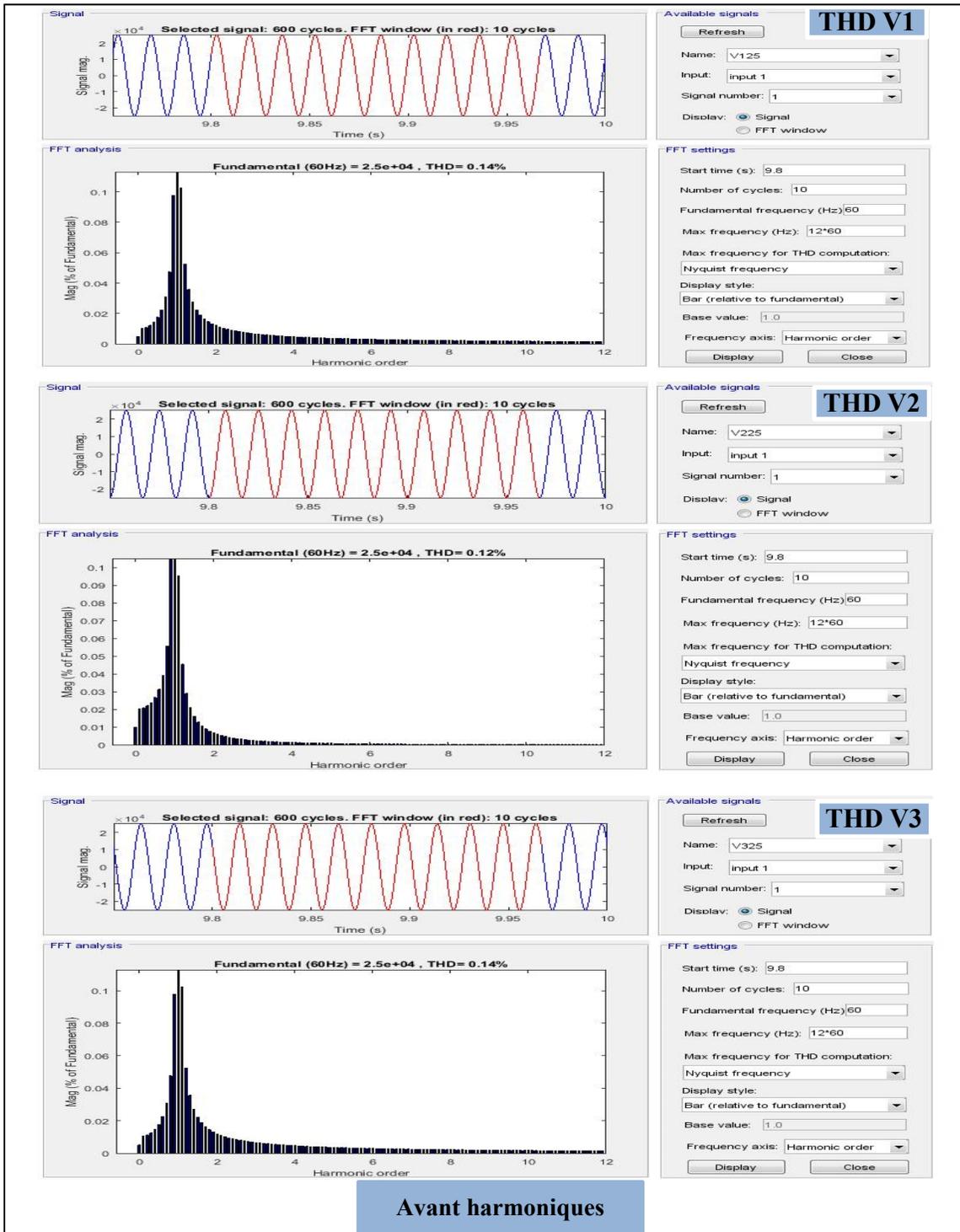


Figure 3.259 Taux de distorsion harmonique THD au niveau de la source, côté 25kV avant l'introduction des harmoniques de courants

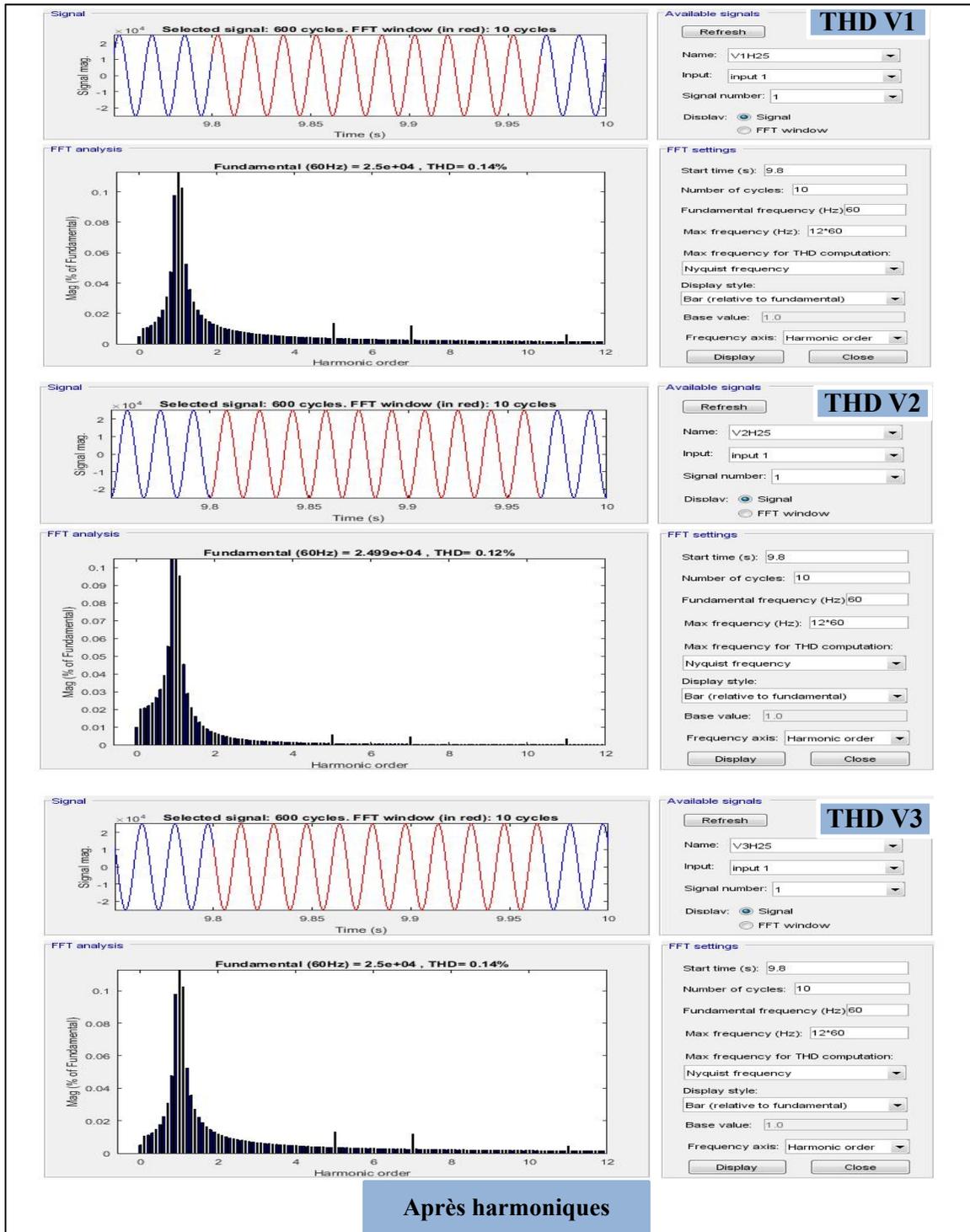


Figure 3.260 Taux de distorsion harmonique THD au niveau de la source, côté 25kV après l'introduction des harmoniques de courants

Comme le montrent les figures 3.258, 3.259 et 3.260, les harmoniques des courants de charge introduits sur le réseau électrique de l'ÉTS n'ont pas vraiment un grand impact sur les tensions de la source, côté 25kV. En effet, les formes d'onde de ces tensions gardent leur forme sinusoïdale, demeurent équilibrés et leur taux de distorsion harmonique reste constant tout au long de l'introduction des harmoniques des courants de charge.

Donc, Il est possible de faire cette étude pour toutes les charges que nous avons mesurées en temps réel dans ce mémoire, tout en se servant de leurs spectres harmoniques de courants de charge et du diagramme de simulation du campus universitaire de l'ÉTS.

Dans la suite de ce travail, nous allons analyser et interpréter les résultats des mesures en temps réel présentés dans la première partie de ce chapitre et nous allons se servir par la suite des interprétations effectuées afin de tester et simuler dans le chapitre 4 le réseau électrique de l'ÉTS ici présenté, tout en raccordant une station de recharge pour les véhicules électriques.

CHAPITRE 4

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE MESURES EN TEMPS RÉEL ET IMPACT DE L'INTÉGRATION D'UNE STATION DE RECHARGE POUR LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU CAMPUS

Dans ce dernier chapitre, nous allons nous intéresser dans un premier temps à analyser et interpréter les résultats des mesures expérimentales obtenus en temps réel avec l'interface Vista Powerlogic dans la première partie du chapitre 3, en particulier les mesures visualisant les formes d'ondes des courants et tensions, leurs spectres et taux de distorsions harmoniques.

Ensuite nous allons analyser les profils des puissances obtenus aux niveaux des charges alimentées par les transformateurs installés dans les différents pavillons et bâtiments que comprend le campus universitaire de l'ÉTS. De plus, Suite à cette analyse et interprétation effectuées des profils des puissances, nous allons prendre comme exemple le raccordement d'une station de recharge pour les véhicules électriques de niveau 3 au réseau électrique de l'ÉTS afin de voir l'impact de l'installation d'une telle charge sur le réseau électrique du campus universitaire.

4.1 Analyse et interprétation des mesures en temps réel effectuées aux bornes des charges raccordées au réseau électrique de l'ÉTS

Dans ce premier paragraphe du chapitre 4, nous allons nous intéresser à effectuer l'analyse d'une part des formes d'ondes obtenus des courants et des tensions ainsi que leurs taux de distorsions et spectres harmoniques et leurs diagrammes de déphasages, et d'autre part des profils des puissances obtenus suite aux mesures des différentes charges installées sur le réseau électrique de l'ÉTS.

4.1.1 Analyse des formes d'ondes des courants et tensions des charges raccordées au réseau électrique de l'ÉTS

Suite aux mesures en temps réel réalisées avec l'interface Vista Powerlogic aux bornes des charges alimentées par tous les transformateurs de 100kVA et plus, installés sur le réseau électrique de l'ÉTS, nous avons pu voir l'évolution des formes d'ondes des courants et tensions, leurs taux de distorsions harmonique ainsi que leurs spectres harmoniques ce qui nous a permis d'avoir une meilleure idée sur la qualité d'onde du réseau électrique de l'ÉTS.

En effet, les formes d'ondes des courants et des tensions, leurs déphasages ; leurs spectres harmoniques et leurs taux de distorsions harmoniques ont été présentés dans la première partie du chapitre 3, c'est-à-dire dans le paragraphe 3.1, et ce pour chaque pavillon et bâtiment du campus, au niveau de chaque charge alimentée par tout transformateur de grande puissance.

Ce que nous pouvons constater c'est que du côté des formes d'onde des tensions, toutes les charges alimentées par les différents transformateurs du campus présentent des formes d'onde de tensions sinusoïdales avec des taux de distorsions harmoniques faibles variant entre 0.6% et 4.5%, ce qui respecte les normes imposées par Hydro Québec vis-à-vis des valeurs des harmoniques des tensions. En effet, nous pouvons voir sur le tableau 4.1 publié par Hydro Québec. (2016), les valeurs des harmoniques des tensions à respecter dans un réseau électrique à moyenne et basse tension.

Tableau 4.1 Valeurs cibles des harmoniques des tensions pour les réseaux à moyenne et basse tension

Tiré de Caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension d'Hydro-Québec (2016, p.16)

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rang harmonique	Tension harmonique	Rang harmonique	Tension harmonique
n	%	n	%
3	6	2	2,0
5	6	4	1,5
7	5	6	0,75
9	3,5	8	0,6
11	3,5	10	0,6
13	3	12 à 24	0,5
15	2		
17	2		
19 à 25†	1,5		

Quant aux formes d'ondes des courants, présentées aussi dans la première partie du chapitre 3, il est clair qu'elles sont loin d'être des formes d'ondes parfaitement sinusoïdales. En effet, la majorité des charges installées sur le réseau électrique de l'ÉTS présentent des formes d'ondes de courants non sinusoïdales et qui présentent plusieurs perturbations.

Ces perturbations se manifestent d'une part par des courants harmoniques dont le taux peut varier entre 0.6% et 95.4% ce qui s'avère un intervalle à valeurs très élevées pour les taux de distorsions harmoniques des courants. Ainsi, il est possible de vérifier si les courants harmoniques individuels pairs et impairs respectent bien les limites d'émissions des courants harmoniques publiées par Hydro-Québec. (2012). En effet, un calcul a été publié par Hydro-Québec et qui permet de vérifier si les taux des harmoniques des courants émis par des charges raccordées à une installation donnée respectent bien les limites d'émission des courants harmoniques imposées par Hydro-Québec.

La méthode de calcul évoquée par Hydro-Québec. (2012) montre qu'il faut tout d'abord se procurer les valeurs de la puissance apparente de court-circuit et de la puissance de référence de l'installation électrique de l'ÉTS et qui sont données par :

$$\begin{cases} S_{cc} = 292MVA \\ S_r = 14.750MVA \end{cases}$$

S_r Puissance apparente de référence de l'installation électrique de l'ÉTS ;

S_{cc} Puissance apparente de court-circuit du réseau électrique de l'ÉTS en conditions générales et en conditions occasionnelles, telle que fournie par Hydro-Québec.

Par la suite, il faudrait calculer le courant de référence comme suit :

$$I_r = \frac{S_r}{\sqrt{3}V_{nom}} \quad (4.1)$$

I_r Courant de référence de l'installation électrique de l'ÉTS ;

V_{nom} Tension nominale au niveau de la charge considérée.

Puis, après avoir obtenu le courant de référence, nous calculons le rapport du courant harmonique individuel correspondant aux différents ordres des harmoniques par le courant de référence calculé ci-dessus. Cependant, le spectre harmonique des courants de charge du panneau PPC1 mentionné précédemment donne les valeurs des pourcentages des harmoniques des courants individuels par rapport au courant fondamental. Pour cela, afin d'avoir les courants harmoniques individuels pour les différents ordres visualisés par le spectre harmonique, il faudrait calculer le produit défini par :

$$I_n = P_{I_n} I_{fond} \quad (4.2)$$

- I_n Courants harmoniques de rangs n de 2 à 50 ;
- P_{I_n} Taux des courants harmoniques individuels pairs et impairs de rangs n obtenu par rapport au courant fondamental I_{fond} ;
- I_{fond} Courant fondamental au niveau de la charge considérée.

D'autre part, pour le calcul du courant fondamental I_{fond} de la charge considérée, il est possible de le prendre égal au courant nominal mesuré en temps réel aux bornes de cette charge en question et tel qu'il est aussi possible de le calculer à partir de la puissance nominale obtenue suite aux mesures réalisées et présentées dans le troisième chapitre au niveau de la charge considérée et qui s'agit de la charge du panneau PPC1 dans notre cas.

Ainsi, le courant fondamental peut être obtenu tel que :

$$I_{fond} = I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}V_{nom}} \quad (4.3)$$

- I_{nom} Courant nominal au niveau de la charge considérée ;
- S_{nom} Puissance nominale au niveau de la charge considérée.

Ainsi, après avoir calculé le courant fondamental, il est possible d'obtenir les courants harmoniques I_n ce qui permet de calculer le rapport de ces courants harmoniques de rangs n par le courant de référence I_r calculé précédemment en utilisant l'équation (4.1).

Notons que pour notre cas de calcul, le rang n est compris entre 2 et 15, puisque le spectre harmonique obtenu pour les différentes charges mesurées en temps réel dans le troisième chapitre ne peut afficher les taux des courants harmoniques individuels pairs et impairs que jusqu'au rang n égale à 15.

Le calcul du rapport I_n/I_r en pourcentage (%) pour tout ordre n allant de 2 à 15 et tel que ce rapport représente le taux des courants harmoniques individuels pairs et impairs, nous permet de vérifier si ces taux ainsi calculés respectent bien les limites imposées, publiées par Hydro-Québec. (2012) et données par les deux tableaux suivants :

Tableau 4.2 Limites des taux de courants harmoniques individuels impairs I_n/I_r (%) en conditions générales
Tiré de Transmission Limites d'émission de perturbations dans le réseau de transport d'Hydro-Québec (2012, p.15)

$S_{cc}générales/S_r$	n=3	n=5	n=7	n=9	n=11, 13	15≤n<23	23≤n<35	35≤n<50
5	1	1,2	0,8	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2
20	1,5	2	1,5	0,75	1	0,65	0,45	0,3
50	2	3	2	1	1,5	1	0,7	0,5
200	4	6	4	2	3	2	1	0,7

Tableau 4.3 Limites des taux de courants harmoniques individuels pairs I_n/I_r (%) en conditions générales
Tiré de Transmission Limites d'émission de perturbations dans le réseau de transport d'Hydro-Québec (2012, p.15)

$S_{cc}générales/S_r$	n=2	n=4	n=6	n=8	10≤n≤50
5	0,75	0,5	0,3	0,2	0,15
20	1,1	0,75	0,45	0,3	0,25
50	1,5	1	0,6	0,4	0,3
200	2,2	1,5	1	0,6	0,4

Pour mieux comprendre le calcul présenté ci-dessus, nous prenons comme exemple le spectre harmonique des courants représenté par la figure 3.75 et obtenu suite aux mesures effectuées aux bornes du panneau 303 alimenté par le transformateur 03-TR-01. Rappelons que ce panneau alimente de nombreuses charges qui ont été énumérées dans le deuxième chapitre.

Parmi ces charges nous mentionnons la salle A-3539 ainsi que la prise présente dans la salle A-3613.

Ainsi, si nous adoptons la démarche de calcul développée précédemment, la première étape serait de calculer le courant de référence donné par l'équation (4.1) ce qui donne :

$$I_r = \frac{S_r}{\sqrt{3}V_{nom}} = \frac{14.750 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 208} = 40942A$$

En plus du courant de référence, il faut aussi calculer les valeurs des courants harmoniques de rang n allant de 2 à 16. Cependant, comme le montre l'équation (4.2), les valeurs de ces courants I_n ne peuvent être obtenues que si le calcul du courant fondamental I_{fond} est fait et qui est donné par l'équation (4.2) telle que :

$$I_{fond} = I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}V_{nom}} = \frac{8.65 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 208} = 24.01A$$

Il est possible dans ce cas de calculer les valeurs des courants harmoniques de rang n allant de 2 à 16 puisque nous avons la valeur du courant fondamental ainsi que les différents taux des courants harmoniques P_{I_n} individuels pairs et impairs de rangs n des trois phases a, b et c, obtenus par rapport au courant fondamental I_{fond} . et donné par le spectre harmonique des courants de charge du panneau (303) visualisé dans la figure 3.75. Nous obtenons ainsi le calcul suivant pour tout ordre harmonique n compris entre 2 et 15 :

n=2	$P_{I_{2a}} = 2\%$	$P_{I_{2b}} = 1\%$	$P_{I_{2c}} = 1.5\%$
n=3	$P_{I_{3a}} = 36\%$	$P_{I_{3b}} = 31\%$	$P_{I_{3c}} = 29\%$
n=4	$P_{I_{4a}} = 1\%$	$P_{I_{4b}} = 1\%$	$P_{I_{4c}} = 1\%$
n=5	$P_{I_{5a}} = 18\%$	$P_{I_{5b}} = 14\%$	$P_{I_{5c}} = 21\%$
n=6	$P_{I_{6a}} = 0.5\%$	$P_{I_{6b}} = 0.5\%$	$P_{I_{6c}} = 0.5\%$

n=7	$P_{I_{7a}} = 16\%$	$P_{I_{7b}} = 17\%$	$P_{I_{7c}} = 20\%$
n=8	$P_{I_{8a}} = 0.5\%$	$P_{I_{8b}} = 0.8\%$	$P_{I_{8c}} = 0.5\%$
n=9	$P_{I_{9a}} = 10\%$	$P_{I_{9b}} = 11\%$	$P_{I_{9c}} = 14\%$
n=10	$P_{I_{10a}} = 0.3\%$	$P_{I_{10b}} = 0.1\%$	$P_{I_{10c}} = 0.1\%$
n=11	$P_{I_{11a}} = 4.5\%$	$P_{I_{11b}} = 9\%$	$P_{I_{11c}} = 12\%$
n=12	$P_{I_{12a}} = 0.3\%$	$P_{I_{12b}} = 0.3\%$	$P_{I_{12c}} = 0.5\%$
n=13	$P_{I_{13a}} = 3\%$	$P_{I_{13b}} = 5\%$	$P_{I_{13c}} = 11\%$
n=14	$P_{I_{14a}} = 0.4\%$	$P_{I_{14b}} = 0.5\%$	$P_{I_{14c}} = 1\%$
n=15	$P_{I_{15a}} = 3\%$	$P_{I_{15b}} = 6\%$	$P_{I_{15c}} = 6.5\%$

Le calcul de ces différents taux des courants harmoniques individuels pairs et impairs de rangs n correspondants à chaque phase a, b et c et obtenus par rapport au courant fondamental I_{fond} , nous permet de calculer par la suite les courants harmoniques de rangs n allant de 2 à 15 tout en utilisant l'équation (4.2). Ainsi, nous obtenons :

n=2	$I_{2a} = 0.8002A$	$I_{2b} = 0.4001A$	$I_{2c} = 0.60015A$
n=3	$I_{3a} = 14.4036A$	$I_{3b} = 12.4031A$	$I_{3c} = 11.629A$
n=4	$I_{4a} = 0.4001A$	$I_{4b} = 0.4001A$	$I_{4c} = 0.4001A$
n=5	$I_{5a} = 7.2018A$	$I_{5b} = 5.6014A$	$I_{5c} = 8.4021A$
n=6	$I_{6a} = 0.20005A$	$I_{6b} = 0.20005A$	$I_{6c} = 0.20005A$
n=7	$I_{7a} = 6.4016A$	$I_{7b} = 6.8017A$	$I_{7c} = 8.002A$
n=8	$I_{8a} = 0.20005A$	$I_{8b} = 0.32008A$	$I_{8c} = 0.20005A$
n=9	$I_{9a} = 4.001A$	$I_{9b} = 4.4011A$	$I_{9c} = 5.6014A$
n=10	$I_{10a} = 0.1203A$	$I_{10b} = 0.040011A$	$I_{10c} = 0.0400A$
n=11	$I_{11a} = 1.80045A$	$I_{11b} = 3.6009A$	$I_{11c} = 4.8012A$
n=12	$I_{12a} = 0.1203A$	$I_{12b} = 0.1203A$	$I_{12c} = 0.20005A$
n=13	$I_{13a} = 1.203A$	$I_{13b} = 2.0005A$	$I_{13c} = 4.4011A$
n=14	$I_{14a} = 0.16004A$	$I_{14b} = 0.20005A$	$I_{14c} = 0.4001A$

$$n=15 \quad I_{15a} = 1.203A \quad I_{15b} = 2.4006A \quad I_{15c} = 2.60065A$$

Pour finir, il faudrait calculer le rapport I_n/I_r avec $2 \ll n \ll 15$ afin de pouvoir comparer ces rapports ainsi calculés avec les valeurs limites des taux de courants harmoniques individuels pairs I_n/I_r (%) figurant dans le tableau 4.2 et le tableau 4.3. Nous obtenons ainsi le calcul suivant :

n=2	$\frac{I_{2a}}{I_r} = 0.002$	$\frac{I_{2b}}{I_r} = 0.001$	$\frac{I_{2c}}{I_r} = 0.0015$
n=3	$\frac{I_{3a}}{I_r} = 0.0352$	$\frac{I_{3b}}{I_r} = 0.03029$	$\frac{I_{3c}}{I_r} = 0.0284$
n=4	$\frac{I_{4a}}{I_r} = 0.001$	$\frac{I_{4b}}{I_r} = 0.001$	$\frac{I_{4c}}{I_r} = 0.001$
n=5	$\frac{I_{5a}}{I_r} = 0.0176$	$\frac{I_{5b}}{I_r} = 0.0137$	$\frac{I_{5c}}{I_r} = 0.02052$
n=6	$\frac{I_{6a}}{I_r} = 0.0005$	$\frac{I_{6b}}{I_r} = 0.0005$	$\frac{I_{6c}}{I_r} = 0.0005$
n=7	$\frac{I_{7a}}{I_r} = 0.01563$	$\frac{I_{7b}}{I_r} = 0.01661$	$\frac{I_{7c}}{I_r} = 0.01954$
n=8	$\frac{I_{8a}}{I_r} = 0.0005$	$\frac{I_{8b}}{I_r} = 0.0008$	$\frac{I_{8c}}{I_r} = 0.0005$
n=9	$\frac{I_{9a}}{I_r} = 0.01$	$\frac{I_{9b}}{I_r} = 0.011$	$\frac{I_{9c}}{I_r} = 0.0137$
n=10	$\frac{I_{10a}}{I_r} = 0.0003$	$\frac{I_{10b}}{I_r} = 0.0001$	$\frac{I_{10c}}{I_r} = 0.0001$
n=11	$\frac{I_{11a}}{I_r} = 0.0044$	$\frac{I_{11b}}{I_r} = 0.009$	$\frac{I_{11c}}{I_r} = 0.01172$
n=12	$\frac{I_{12a}}{I_r} = 0.0003$	$\frac{I_{12b}}{I_r} = 0.0003$	$\frac{I_{12c}}{I_r} = 0.0005$
n=13	$\frac{I_{13a}}{I_r} = 0.003$	$\frac{I_{13b}}{I_r} = 0.005$	$\frac{I_{13c}}{I_r} = 0.011$
n=14	$\frac{I_{14a}}{I_r} = 0.0004$	$\frac{I_{14b}}{I_r} = 0.0005$	$\frac{I_{14c}}{I_r} = 0.001$
n=15	$\frac{I_{15a}}{I_r} = 0.003$	$\frac{I_{15b}}{I_r} = 0.006$	$\frac{I_{15c}}{I_r} = 0.00635$

Comme nous pouvons le voir sur les deux tableaux 4.2 et 4.3, pour pouvoir comparer les valeurs calculées des différents rapports I_n/I_r avec les valeurs limites de ces derniers, il faut tout d'abord calculer le rapport S_{cc}/S_r ce qui donne :

$$\frac{S_{cc}}{S_r} = \frac{292}{14.750} = 19.79 \cong 20$$

Donc, les valeurs des taux des courants harmoniques individuels pairs et impairs I_n/I_r (%) pour n allant de 2 à 15 seront comparées par rapport aux limites figurant dans la deuxième ligne des deux tableaux 4.2 et 4.3.

En conclusion, cette méthode de calcul présentée ci-dessus est applicable non seulement pour l'exemple du panneau (303) qui comme nous l'avons mentionné est alimenté par le transformateur 03-TR-01, mais aussi pour toute charge raccordée au réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS et dont les mesures sont représentées dans la première partie du troisième chapitre.

Étant donné l'impact que peut avoir les harmoniques des courants si leurs taux dépassent les limites indiquées dans les deux tableaux 4.3 et 4.2, il est conseillé d'effectuer ce calcul des taux des courants harmoniques individuels pairs et impairs I_n/I_r (%) qui peuvent être à l'origine de plusieurs facteurs tels que le type de charges qui sont raccordées au réseau vu que les charges non linéaires ont tendance à engendrer des harmoniques sur le réseau électrique.

En effet, ces courants harmoniques, s'ils persistent dans le réseau électrique peuvent entraîner comme c'était expliqué par H. Sakkou. (2007) d'une part des problèmes de vibrations au niveau des équipements ce qui causera à la longue l'usure prématurée de la mécanique des équipements et d'autre part, des harmoniques de tensions si le taux des

harmoniques de courants ne sont pas réduits ou éliminés ce qui facilitera leur passage à travers les impédances.

Tous ces effets néfastes des harmoniques des courants, comme c'était indiqué par H. Sakkou. (2007), auront comme conséquences un échauffement au niveau des équipements raccordés au réseau électrique de l'ÉTS et même le risque de problème d'interférence soit avec les autres utilisateurs raccordés à la même source soit avec les réseaux de télécommunication ce qui peut affecter l'efficacité des équipements de protection comme les fusibles et même le risque de problème de résonance.

De plus, l'usure mécanique des équipements entraîne leur surdimensionnement, ce que nous allons traiter en détails dans le paragraphe suivant de ce chapitre et ce qui entrainera par la suite la dégradation de l'efficacité énergétique du réseau électrique de l'ÉTS.

D'autre part, En plus des harmoniques des tensions, autres perturbations peuvent se manifester suite aux harmoniques des courants, comme c'était détaillé par Hydro Québec. (2016) dans « Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension d'hydro-Québec » comme les surtensions, les creux de tensions et le déséquilibre des tensions. En effet, le problème de déséquilibre touche les tensions mais également les courants sur le réseau. Ce déséquilibre est essentiellement causé par le déséquilibre des charges, ce qui a été constaté à partir des diagrammes de déphasage des courants présentés dans le chapitre 3 pour la majorité pour ne pas dire toutes les charges, telles qu'elles présentent des diagrammes de déphasage de courants triphasés où ces derniers ne sont ni égaux en amplitudes ni déphasés de 120° .

Selon les résultats des mesures réalisées au niveau des différentes charges installées sur le réseau électrique du campus de l'université et présentés dans le paragraphe 3.1 du chapitre 3 ; il est clair que les courants de charges sont déséquilibrés. Cela a été constaté d'un côté à partir des diagrammes de déphasages des courants des charges montrées par toute figure

sous-titrée « Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge » et qui montre clairement que l'angle de déphasage entre les courants de charge est différent de 120° . Mais d'un autre côté, à partir des valeurs des courants de charge par phase en temps réel montrées par toute figure portant le titre « Courants, tensions, puissance active, réactive et apparente ainsi que le THD des courants et tensions au niveau de la charge », où nous pouvons clairement voir que les amplitudes des courants de charge par phase ne sont nullement égales et parfois même telles que la valeur de l'une est égale à deux fois celle de l'autre. Ce déséquilibre prononcé des courants de charges peut engendrer des conséquences néfastes sur le réseau électrique de l'ÉTS.

Parmi ces conséquences, nous pouvons mentionner la génération des harmoniques de fréquences multiples notamment les harmoniques de rang 3 ce qui peut affecter le courant du neutre comme l'a expliqué Jacques Schonek. (2000) de Schneider Electric, puisqu'il risque de se surcharger vu qu'il correspond à la sommation des courants harmoniques de rang 3 par phase. Ainsi, si le neutre est surchargé alors qu'il était sous-dimensionné, il y aura un risque de rupture du neutre ce qui peut même provoquer un incendie.

En plus, le déséquilibre des courants aux bornes des charges en question tel qu'il était mentionné par H. Sakkou. (2007), peut même déranger d'un côté le fonctionnement des autres récepteurs connectés à la même installation électrique de l'ÉTS et d'un autre côté les appareils assurant la protection de l'installation électrique. Par la suite, le problème de déséquilibre peut engendrer le problème d'échauffement et le vieillissement des différents équipements raccordés au réseau électrique du campus et ainsi la dégradation du rendement énergétique du réseau électrique.

Pour ces raisons, il faut remédier au problème de déséquilibre des charges, et pour ce faire, il faut tout d'abord identifier les facteurs ou causes qui ont pu amener à ce déséquilibre et l'un des principaux facteurs est la non-linéarité des charges raccordées à l'installation électrique de l'ÉTS.

Nous pouvons démontrer ce déséquilibre des tensions en prenant comme exemple des mesures effectuées aux bornes au du panneau (306) alimenté par le transformateur 01-TR-02 installé dans le local A-1531 du pavillon A.

Nous rappelons les mesures des tensions triphasées au niveau du panneau (306), vues dans la première partie du chapitre 3 et dans la figure 3.42 pour être exacte, qui montre les tensions par phase telles que :

$$V_{ca}=115V, V_{bc}=113V, V_{ab}=198V$$

Pour savoir si le déséquilibre des tensions est assez élevé, Hydro-Québec. (2014) a publié une méthode de calcul qui permet de déterminer si les tensions possèdent un déséquilibre élevé ou pas. En effet la première étape serait de calculer la valeur moyenne des tensions triphasées données ci-dessus, ce qui donne la tension moyenne qui est égale à :

$$V_{moy} = \frac{V_{ca} + V_{bc} + V_{ab}}{3} = 142V$$

Ensuite, il faudrait calculer la différence entre la valeur de la tension moyenne et la valeur de la tension entre phases qui donne le plus grand écart par rapport à la valeur de la tension moyenne qui s'agit dans ce cas de la tension V_{ab} , et diviser le calcul de la différence obtenu par la valeur de tension moyenne ce qui donne le taux de déséquilibre qui est tel que :

$$Taux_{déséquilibre} = \frac{V_{ab} - V_{moy}}{V_{moy}} \times 100 = \frac{198 - 142}{142} \times 100 = 39.4366\%$$

Ainsi le taux de déséquilibre des tensions calculé pour l'exemple de la charge du panneau (306) connecté au transformateur 01-TR-02 installé dans le local A-1531 du pavillon A, est

égale à 39.682% qui est énormément élevé par rapport à 2% comme c'était indiqué par Hydro-Québec. (2014) et dans ce cas il est conseillé d'intervenir pour régler le problème de déséquilibre des tensions au niveau de cette charge qui est le panneau (306).

Après avoir énuméré les conséquences possibles sur le réseau des deux formes de perturbations qui sont les harmoniques des courants des charges et leurs déséquilibres détectés suite aux mesures effectués en temps réel avec l'interface Vista Powerlogic, il est clair qu'il faut remédiera à ces anomalies détectées aux bornes des charges. Autrement dit, il faudrait essayer d'équilibrer les charges et d'éliminer ou réduire le taux des harmoniques des courants notamment, les harmoniques de multiple 3 détectés sur la plupart des charges raccordées au réseau électrique de l'ÉTS telles qu'elles apparaissent sur les spectres harmoniques des courants des charges présentés par toute figure sous-titrée « Formes d'ondes, spectre harmonique et déphasage des courants I1 I2 I3 au niveau de la charge ».

Nous passons maintenant à l'analyse des résultats des profils des puissances obtenus suite aux mesures en temps réel effectuées avec Vista.

4.1.2 Analyse des profils des puissances des charges raccordées au réseau de l'ÉTS

Dans la première partie de ce paragraphe, nous allons plutôt nous intéresser aux valeurs obtenues des puissances réactives afin d'étudier leurs signes pour avoir une meilleure idée sur le type des charges qui sont raccordées au réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS.

Par la suite, nous allons analyser les résultats obtenus pour les puissances actives et apparentes ce qui va nous permettre d'effectuer un choix optimal vis-à-vis des transformateurs pour savoir où serait-t-il possible de connecter une station de recharge pour les voitures électriques.

4.1.2.1 Bilan des puissances réactives des charges raccordées au réseau électrique du campus de l'ÉTS

Dans la première partie de ce paragraphe, nous allons plutôt nous intéresser aux puissances réactives afin d'étudier leurs signes pour avoir une meilleure idée sur le type des charges qui sont raccordées au réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS.

Pour ce faire, nous avons transféré sur des fichiers XL les résultats obtenus avec l'interface Vista des puissances réactives de toutes les charges du campus qui ont été mesurées en temps réel et nous avons effectué le bilan des puissances réactives pour chaque pavillon ou bâtiment du campus universitaire ; ce bilan est présenté par le tableau suivant :

Tableau 4.4 Bilan des puissances réactives en kVAr pour toutes les charges raccordées au réseau électrique du campus universitaire

Local	Transfo	Qmoy	Qmax	Qmin	Local	Transfo	Qmoy	Qmax	Qmin
PAVILLON A					PAVILLON B				
A-0350	TPP IR	-0,93673729	-0,062	-2,663	B-0102	RC-TR-01	-0,33013891	6,773	-2,631
A-0450	TBR	0,5391743	1,572	0,199	B-1102	01-TR-01			
A-0692	RC-TR-01					P12	-0,13891111	0,04	-0,259
	P1	-0,22233224	0,395	-0,414		P13	-0,56572874	-0,38	-0,717
	P3	-0,06384105	0,076	-0,151		P14	-0,58101965	-0,371	-0,873
	TOTAL	-0,28617329	0,471	-0,565		01-AG-03	-3,02054737	-2,714	-3,29
	RC-TR-02	-0,03192052	0,076	-0,151	TOTAL	-4,30620688	-3,425	-5,139	
A-0840	TPP HR	-0,38103209	0,35	-1,14	B-2102	02-TR-01			
A-1362	TPP A1	-0,84808163	-0,17	-1,892		P21	-1,51689063	-0,378	-2,422
A-1508.1	TBI	-4,20755405	-3,735	-4,761		P22	-0,46577593	-0,304	-0,558
	T-A-1531					P26	-0,93278261	0,634	-1,312
P(305)		-2,71672142	-1,204	-3,86		02-AG-03	-3,45947127	-0,236	-5,119
P(306)		-2,54677551	-1,738	-2,918	TOTAL				
TOTAL		-5,26349693	-2,942	-6,778	B-3102	03-TR-01			
A-1850	TPP C1	-3,08231553	-1,741	-4,839		P31	0,01451282	0,418	-0,263
A-2536.1	T1-A-2536.1	-1,57429076	-1,527	-1,615		P32	-0,08565517	0,127	-0,391
	T2-A-2536.1	-10,0613433	-9,896	-10,53		P33	-0,42206818	-0,303	-0,565
A-2840	TPP D2	0,00699347	0,165	-0,188		TOTAL	-0,49321053	0,242	-1,219
A-3502	T2-A-3502	-2,34830837	-2,264	-2,437	Local	Transfo	Qmoy	Qmax	Qmin
A-3540	03-TR-01				PAVILLON E - MAISON DES ÉTUDIANTS				
	P(303)	-1,45219137	-1,189	-1,891	E. S2-013	TR-SS2-2	-0,53767939	1,061	-1,801
	P(304)	-0,9831831	-0,378	-1,318	E. S2-013	TRANSFO CHILLER 2	4,23189777	9,799	0,068
	TOTAL	-2,43537447	-1,567	-3,209	6-001	TR-A-1	-1,97426994	-0,884	-2,91
A-3548	03-TR-02				Local	Transfo	Qmoy	Qmax	Qmin
	P(307)	-1,23113636	-1,047	-1,391	MARCHÉ METRO				
	P(308)	1,45400116	2,112	0,242	Metro SS1	MA-TR-0102	12,623233	15,21	10,029
TOTAL	0,22286479	1,065	-1,149	Metro SS1	MA-TR- 0101	-5,71101124	-4,44	-10,348	
A-3548	T2-A-3548				Local	Transfo	Qmoy	Qmax	Qmin
	P35	-7,63845823	-4,534	-7,694	RÉSIDENCE PH4				
	P36	-5,89794579	-5,253	-5,971	R4-105	TL-RA	-1,48998168	-0,946	-2,094
TOTAL	-13,536404	-9,787	-13,665	R4-123	TL-RB	-0,84463771	0,146	-2,49	
A-3886	TPP A3	-1,06615811	1,447	-1,537	R4-904	TL-8A	-3,03080612	-1,714	-4,416
A-3853	TPP C3	0,98383967	1,678	0,436	R4-913	TL-8B	-2,99905759	-1,007	-6,757
Local	Transfo	Qmoy	Qmax	Qmin	Local	Transfo	Qmoy	Qmax	Qmin
CLUMEQ					INGO				
A-4530	TR 04-03	-17,7713872	-12,609	-19,811	409	04-TR-401	2,47054707	9,654	-0,239
	TR 04-04	-16,2259785	-12,467	-18,034	708	07-TR-401	2,08218876	7,946	-0,553
	TR 04-05	-16,7904223	-13,407	-18,823	Local	Transfo	Qmoy	Qmax	Qmin
	TR 04-07	-14,0855673	-11,687	-14,995	RÉSIDENCE PH1				
	TR 04-08	-19,9513488	-18,128	-21,191	R1-00084	T-A	1,66670119	5,581	-1,047

Comme nous pouvons le voir sur le tableau ci-dessus, une première partie des charges présentent des puissances réactives de signe négatif ce qui signifie qu'elles se comportent comme des charges capacitives. Quant à la deuxième partie, elle est représentée par l'ensemble de charges ayant des puissances réactives dont le signe est positif indiquant que ces charges en question sont du type inductif. Cependant, nous remarquons aussi une troisième partie de charges qui changent de comportement, c'est-à-dire que tantôt elles se comportent comme des charges capacitives et tantôt elles présentent un comportement de charges inductives.

Pour la première partie qui s'agit des charges capacitives, nous pouvons mentionner quelques exemples pour chaque pavillon. Commençons par le pavillon A tel que nous prenons comme exemples les panneaux alimentés par les transformateurs T2-A-2536.1, et T2-A-3548 qui se chargent essentiellement de l'alimentation des serveurs installés dans A-3550. En effet, le panneau (900) qui est alimenté par T2-A-2536.1 est connecté à plusieurs autres panneaux électriques comme (902), (906), (903) et (907) tels que les deux derniers, c'est-à-dire (903) et (907) qui sont localisés dans la salle des serveurs A-3550 et qui alimentent une partie des cabines de serveurs qui y sont installées. En plus de ces serveurs, une description détaillée des types des charges alimentées par les deux autres panneaux (902) et (906) est présentée dans le paragraphe 3.1.1 du chapitre 3.

Du côté du transformateur T2-A-3548, il alimente les deux panneaux P(35) et P(36) qui à leur tour alimentent l'autre partie restante des cabines des serveurs du local A-3550. Parmi les charges qui ont aussi été démarquées par leurs puissances réactives assez élevées et de signes négatifs, nous pouvons mentionner les CLUMEQ qui sont installés au 4^{ème} étage du pavillon A au local A-4530. En effet, comme c'était mentionné dans le deuxième paragraphe 3.1.2 du chapitre 3, chacun des cinq panneaux mesurés et connectés aux cinq transformateurs CLUMEQ figurant dans le tableau 4.1, alimente une partie des serveurs CLUMEQ. Nous avons décrit pareillement quelle partie est alimentée par exactement quel panneau dans le paragraphe 3.1.2 du chapitre 3.

Nous passons maintenant aux exemples des charges inductives installées dans le pavillon A telles que le panneau (308) alimenté par le transformateur de type zigzag 03-TR-02 et dont la charge présente une puissance réactive positive comme le montre le tableau ci-dessus. Le panneau (308) alimente trois autres panneaux qui sont (43), (44) et (45). Ces trois panneaux alimentent plusieurs charges comme des prises de bureaux, des prises caniveaux, des prises d'une salle de télécom A-4509, des prises pour un réfrigérateur, les prises pour les tours d'eau 1, 2, et 3. Des prises pour l'éclairage extérieur et pour assurer la déconnexion de la machine installée dans la salle A-4401. Ils alimentent de même plusieurs ventilateurs d'évacuation VE-76, VE-77, VE-78 et VE-71 et des pompes de filtration PF-1, PF-2, PF-3 et PF-4 pour les tours d'eau.

En plus du panneau (308), nous pouvons aussi prendre comme exemple de charge inductive le panneau PPC3 alimenté par le transformateur TPPC3. Ce panneau tel qu'il était expliqué dans le premier paragraphe 3.1.1 du chapitre 3 est connecté à une soudeuse et à cinq autres panneaux qui sont le panneau M3, le panneau E3, le panneau K3, le panneau L3 et le panneau (37).

Ces panneaux alimentent des prises de locaux et couloirs, un moteur de ventilation, des ventilateurs d'évacuation VE-10, VE-42, VE-45 et VE-44. Ils alimentent aussi une pompe Glyco, un moteur M3 pour l'évier, les séchoirs à main des toilettes, l'abreuvoir, deux thermopompes TP-18 et TP-18.

En plus des charges de types inductives et capacitatives, le tableau 4.2 montre qu'ils existent autres charges dont les puissances réactives moyennes et maximales sont positives tandis que très rarement elles chutent pour atteindre une valeur négative comme par exemple le panneau PPD2 alimenté par le transfo TPPD2 et qui alimente de son côté autres panneaux comme J2, N2, L2, G2, R2 et H2. Ces derniers alimentent de multiples prises de salles et plusieurs locaux, des hottes, des compteurs, la pompe 2, une machine PYRADIA verte, une

tronçonneuse, une autre machine de type Fritsch Pulvarisette Vario Panitary Mill. De plus, le panneau N2 alimente le panneau O2 qui alimente le laboratoire GREPCI.

Nous passons maintenant au pavillon B, comme nous pouvons le voir sur le tableau 4.2, nous avons soit des charges présentant des puissances réactives négatives, ce qui prouvent qu'elles se comportent comme des charges capacitives telles que les charges connectées aux deux augets 01-AG-03 et 02-AG-03 qui sont alimentés respectivement par les transformateur 01-TR-01 et 02-TR-01 qui sont installés respectivement dans B-1102 et B-2102. Soit des charges dont les puissances réactives moyennes et minimales sont négatives avec une augmentation occasionnelle des puissances réactives de ces charges pour atteindre des valeurs maximales positives comme par exemple les charges connectées et alimentées par le panneau (10) nommé aussi le panneau RC-D2-01 qui est alimenté par le transformateur RC-TR-01 localisé dans B-0102. Soit des charges avec des puissances réactives moyennes et maximales positives mais ayant des valeurs minimales négatives comme les charges alimentées par le panneau (31) qui est alimenté de son côté par le transformateur 03-TR-01 installée dans le local B-3102.

Pour les deux augets 01-AG-03 et 02-AG-03, comme c'était expliqué dans le paragraphe 3.1.3 du chapitre 3, sont connectés respectivement aux panneaux (11), (15) et (23), (24), (25). Pour les panneaux (11) et (15) ils alimentent des prises de locaux, de services et principalement les serveurs installés dans la salle B-1666. Du côté des panneaux (23), (24), (25), ils alimentent toutes les machines et équipements installés dans le département de cheminement universitaire et technologique.

Ensuite, pour le panneau (10) nommé aussi RC-D2-01, il est connecté aux panneaux (3), (4), (5) et (1) qui alimentent des prises, des locaux, une thermopompe, les séchoirs à mains des toilettes, ventilateur de transfert VT-101, un four et un frigo, un ventilateur d'alimentation VA-103, un ventilateur d'évacuation VE-101, des imprimantes comme celle du type LATEX 210 et les bornes de recharges pour les véhicules électriques installées au sous-sol 1.

Quant au troisième type de charges telles que celle qui sont alimentées par le panneau 31 qui alimente essentiellement la salle de gym et tout ce qui l'entourent au 3^{ème} étage y compris les prises, les machines, les vestiaires avec les séchoirs et tous les équipements y existent.

Par la suite, le tableau 4.2 présente de même les mesures et signes des puissances réactives obtenues au niveau des charges installées dans le pavillon E qui est aussi la maison des étudiants. Comme le montre le tableau 4.2, ils existent trois types de charges installées dans le pavillon E; le premier type est donné par des charges qui possèdent des puissances réactives de signes positifs ce qui signifie qu'elles se comportent comme des charges inductives tel que le refroidisseur CHILLER 802 alimenté par le transformateur CHIILER 2. Le deuxième type est tel que les puissances réactives des charges installées dans le pavillon E sont de signes négatifs comme les charges qui sont connectées au panneau PR-A-1 et qui dans ce cas ont un comportement de charges capacitives.

Et le troisième type s'agit des charges qui donnent des valeurs de puissances réactives moyennes et minimales avec un signe négatif mais des valeurs de puissances maximales avec un signe positif, comme par exemple les charges alimentées par le par le panneau PR-SS2-1 alimenté par le transformateur PR-SS2-2. Rappelons comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe 3.1.4 du chapitre 3, que le panneau PR-SS2-1 alimente des bornes de recharge pour les véhicules électriques et autres panneaux électriques comme PR-1-1, PR-2-1, PR-3-1 et PR-SS2-2 tout en sachant que ce dernier alimente de son côté plusieurs autre charges comme : des prises, des locaux, des aérothermes, des ventilateurs d'évacuation VE-810, VE-807, VE-802, VE-803, VE-804 et VE-802, un ventilateur d'alimentation VA-803, des prises pour éclairage des puits et ascenseurs, les TV aux ascenseurs, le cabinet chauffant radiant, le réservoir eau chaude et les portes de la maison des étudiants pour qu'elles soient retenues.

En plus de la maison des étudiants, nous pouvons voir aussi les résultats des mesures des puissances réactives au niveau des charges du marché Metro ; il s'agit des deux panneaux MA-D2-0102 et MA-D2-0101 qui sont connectés respectivement aux transformateurs MA-

TR-0101 et MA-TR-0102. Les mesures des puissances réactives du côté du panneau MA-D2-0102 donnent des valeurs de puissances réactives moyennes, maximales et minimales de signes négatifs, ce qui prouve que les charges alimentées par ce panneau se comportent comme des charges capacitives. Énumérons ainsi les différentes charges, comme c'était fait dans le paragraphe 3.1.5 du chapitre 3, tel que le panneau MA-D2-0102 alimente le cuiseur à homard, les fours à pizza, la cuisine ainsi que la cuisinière, la friteuse, le four 14 consacré pour la boulangerie et les deux panneaux électriques MA-E2-0106 et MA-E2-0105 qui alimentent à leurs tours le coin pâtisserie et poissons ainsi que autres équipement non spécifiés et installés dans le marché Metro.

Quant aux mesures des puissances réactives du côté du panneau MA-D2-0101, elles présentent des valeurs de puissances réactives moyennes, maximales et minimales de signes positifs, ce qui signifie que les charges connectées à ce panneau ont un comportement de charges inductives. Ainsi nous rappelons dans ce contexte, comme c'était expliqué auparavant dans le paragraphe 3.1.5 du chapitre 3, que les charges alimentées par le panneau MA-D2-0101 sont les panneaux MA-E2-0301 (E), MA-E2-0103 (H), MA-E2-0102 (D), MA-E2-0201 (B) et MA-E2-0101 (C). Ces derniers alimentent des rails, des hottes, un compresseur, une emballeuse digitale, l'éclairage, le stationnement, le contrôleur de pack MEO, des ventilateurs de transfert et d'évacuation VT-11 et VE-11, la salle mécanique au niveau 1, l'ascenseur, un chargeur pour la génératrice, la machine à cuvette, des câbles chauffants, un chargeur à batterie, les bureaux et réception de Metro.

De même, des résultats de mesures des valeurs moyennes, maximales et minimales des puissances réactives aux bornes des charges installées dans la résidence PH4 ont été donnés par le tableau 4.1.

Ces résultats montrent l'existence de deux types de charges ; celles aux bornes desquelles nous avons obtenus des valeurs de mesures de puissances réactives moyennes, maximales et

minimales de signes négatifs, ce qui signifie qu'elles se comportent comme des charges capacitives comme les charges connectées au panneau PDS-8A alimenté par TL-8A.

Et d'autres, comme le panneau PDS-RB alimenté par TL-RB, aux bornes duquel nous avons obtenus des valeurs de mesures de puissances réactives moyennes et minimales de signe négatif, mais tel que la valeur maximale de la puissance réactive est positive.

Afin de mieux comprendre les résultats des mesures des puissances réactives obtenus, nous allons détailler, comme c'était fait dans le paragraphe 3.1.6 du chapitre 3, ce que les deux panneaux PDS-8A et PDS-RB alimentent comme charges. Pour le panneau PDS-8A, il alimente les panneaux électriques installés dans les logements localisés au 8^{ème} et 9^{ème} étage de la résidence PH4 et qui sont dans le même secteur où il est installé ainsi que le panneau PS-8A qui lui alimente des prises des corridors et de concierge de différents étages, un compresseur UTA-2-CP et un ventilateur d'évacuation VE-2.

Quant au panneau PDS-RB, il alimente tous les panneaux électriques des logements localisés dans le même secteur que l'endroit où est installé en plus du 1^{er} et 2^{ème} étage, ainsi que le panneau PS-RB qui alimente de son côté des prises. Il s'agit de prises du sous-sol, des corridors du rez-de-chaussée, du 1^{er} étage 2^{ème} étage et 3^{ème} étage. Il alimente aussi la porte du garage, l'ouvre porte passerelle, un câble chauffant, une thermopompe TPS2, des prises pour l'éclairage extérieur, l'éclairage pour l'ascenseur et l'enseigne extérieure. Plusieurs pompes sont aussi alimentées par le panneau PDS-RB, telles que PCR-N1, PCR-N2, PCR-N3, PCR-N4, PCR-N8 et PCR-N9.

Pour finir, un compresseur au sous-sol R4-S045, des ventilateurs d'évacuation VE-6 et VE-5, un ventilateur d'alimentation VA-1, une pompe GLYCOL et une unité d'air neuve sont aussi alimentés par PDS-RB.

En plus, il est possible aussi de voir sur le tableau 4.2 les mesures des valeurs de puissances réactives des charges du carrefour d'innovation INGO, tel qu'il existe un seul type de charges pour ce bâtiment qui s'agit de charges ayant des valeurs de puissances réactives moyennes et maximales qui sont de signes positives mais avec des puissances réactives minimales négatives.

Nous prenons comme exemple le panneau 07-E2-401 (70) tel que comme c'était mentionnée dans le paragraphe 3.1.8, il est alimenté par le transformateur 07-TR-401 et alimente à son tour le panneau 06-E2-401, deux thermopompes TP-410B et TP-410A et une pompe de surpression PS-410.

Nous terminons avec la résidence PH1, où nous avons mesuré un seul panneau qui est le panneau P-A alimenté par le transformateur TA-BUANDERIE et tel que comme le montre le tableau 4.1, les mesures aux bornes de ce panneau ont abouti à des valeurs de puissances réactives moyennes et maximales positives, mais avec une valeur minimale de signe négatif. Rappelons que le panneau P-A alimente les laveuses, les sécheuses et la salle de cinéma maison qui sont toutes installées dans la résidence PH1. Il alimente en plus deux démarreurs systèmes S-3 et E-5, un panneau de contrôle pour les laveuses, les sécheuses et la machine permettant aux étudiants de charger leurs cartes à lavage dans la salle de Buanderie. Enfin, panneau P-A alimente de même le dépanneur y compris la chambre froide et l'éclairage de ce dépanneur, la prise TV, les prises des ordinateurs #1 et #2 de type GARRETT, les toilettes et la buanderie.

Toutes les autres charges raccordées au réseau du campus de l'ÉTS, mesurées en temps réel et telles que les mesures obtenues de leurs puissances réactives moyennes, maximales et minimales sont listées dans le tableau 4.2, sont bien décrites et détaillées dans la première partie 3.1 du chapitre 3.

Après avoir présenté et analysé les bilans des puissances réactives des différentes charges raccordées au réseau électrique du campus universitaire, nous analyserons dans le paragraphe qui suit les bilans des puissances apparentes obtenus suites aux mesures effectuées aux bornes des charges installées sur le réseau électrique de l'ÉTS en temps réel avec l'interface Vista.

4.1.2.2 Bilan des puissances apparentes des charges raccordées au réseau électrique du campus de l'ÉTS

Après avoir présenté le bilan de puissances réactives des différentes charges du campus universitaire, nous allons nous intéresser dans ce paragraphe aux mesures des puissances apparentes des différentes charges obtenues en temps réel avec l'interface Vista. En effet, ces mesures ont été transférées sur des fichiers XL et un calcul de la valeur moyenne et maximale des puissances apparentes a été fait et ce, aux bornes de toute charge connectée au réseau électrique de l'ÉTS via tout transformateur de puissance apparente nominale supérieure ou égale à 100kVA.

D'autre part, ces valeurs calculées des puissances apparentes moyennes et maximales des différentes charges ont été comparées avec les puissances nominales des transformateurs de 100kVA et plus qui alimente ces charges. Cette comparaison a pour but d'analyser la consommation réelle de chaque charge par rapport au transformateur qui l'alimente. Ainsi, nous avons obtenu les diagrammes de puissances apparentes pour chaque pavillon et bâtiment et qui sont présentés comme suit :

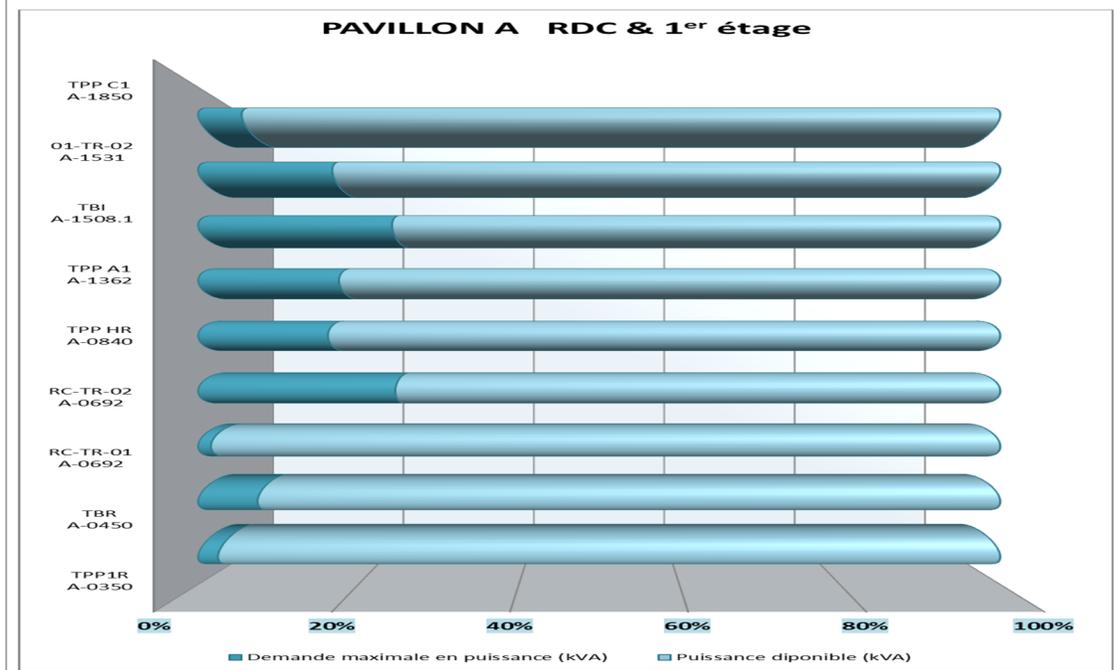
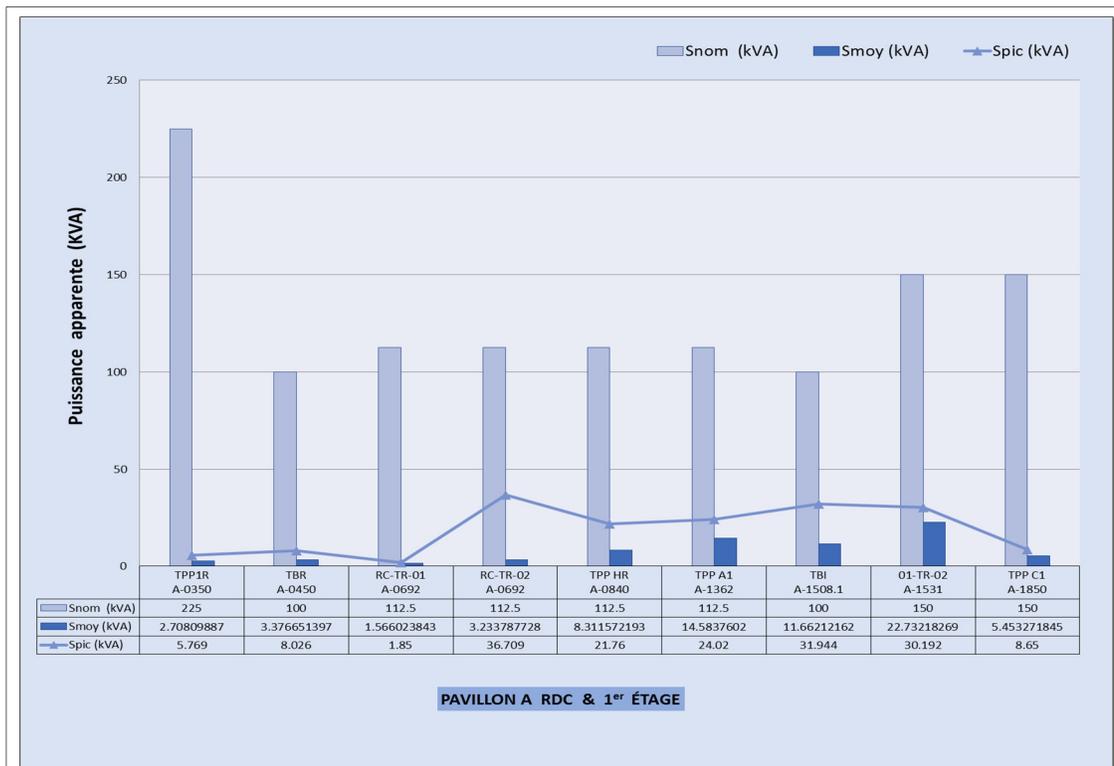


Figure 4.1 Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés aux rez-de-chaussée et 1^{er} étage du pavillon A

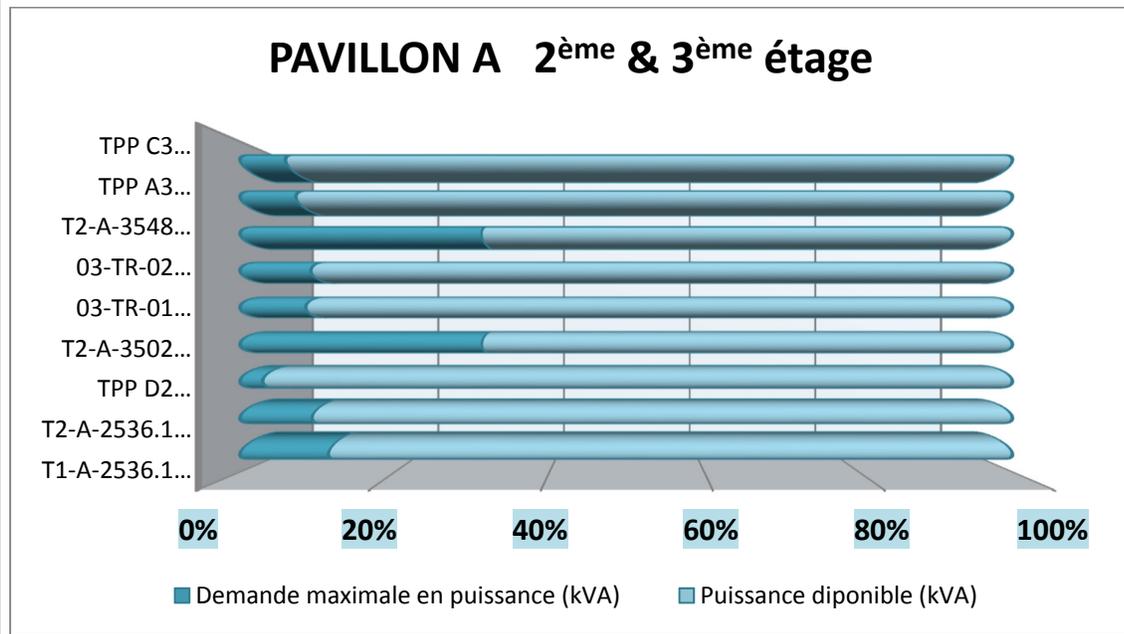
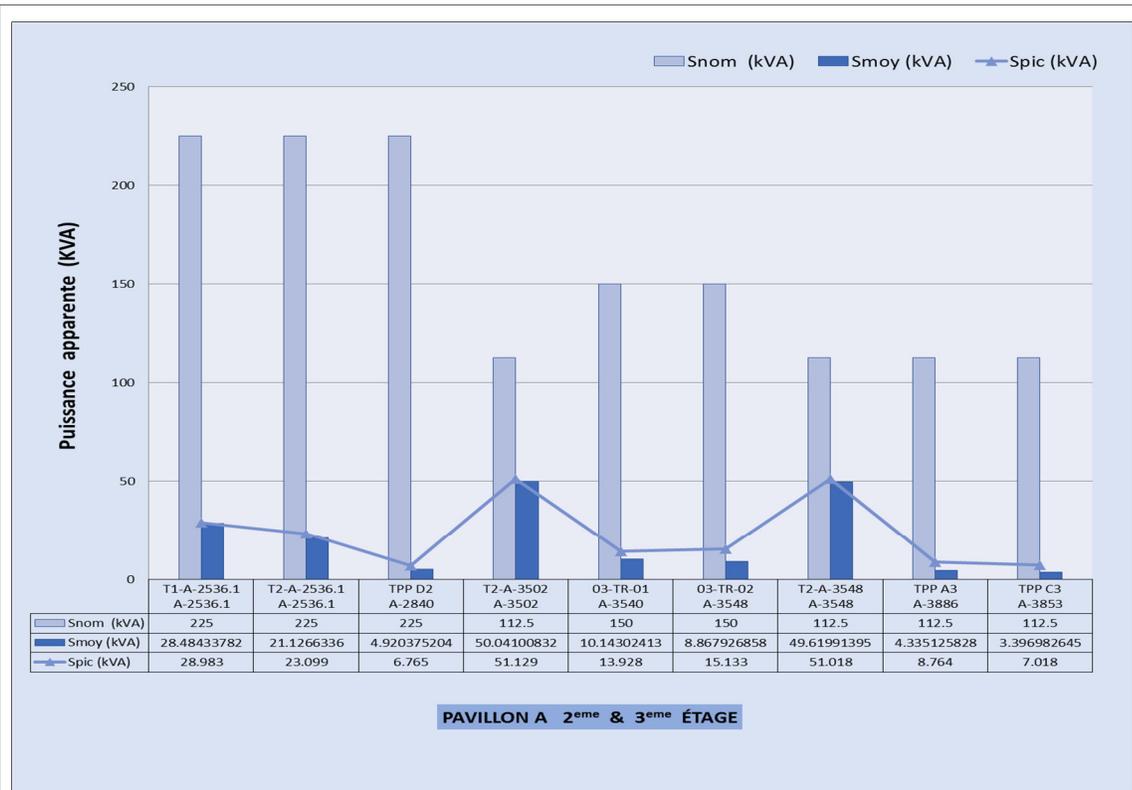


Figure 4.2 Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux bornes des transformateurs installés au 2^{ème} et 3^{ème} étage du pavillon A



Figure 4.3 Diagramme des bilans des puissances apparentes des CLUMEQ raccordés aux transformateurs installés au 4^{ème} étage du pavillon A

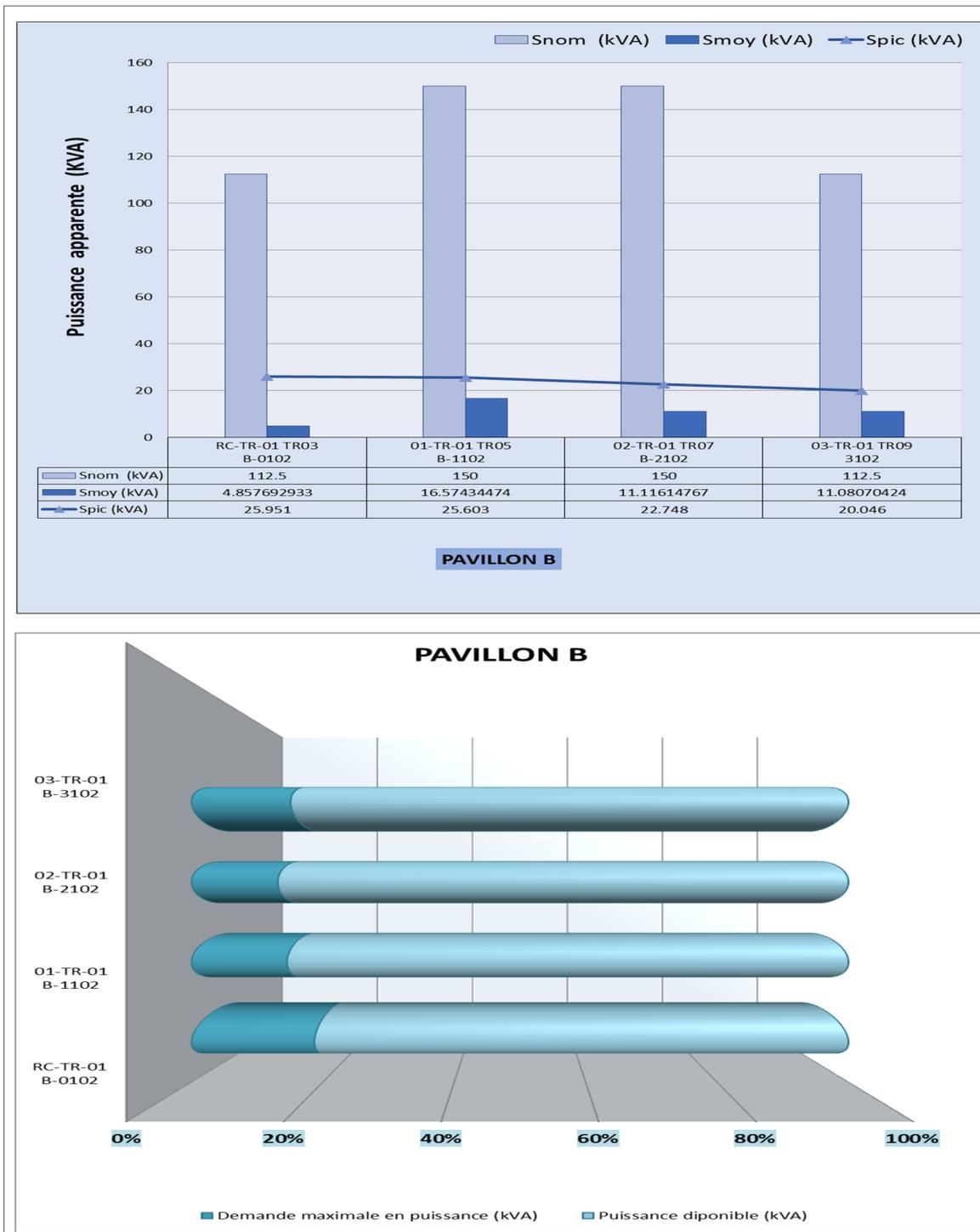


Figure 4.4 Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans le pavillon B

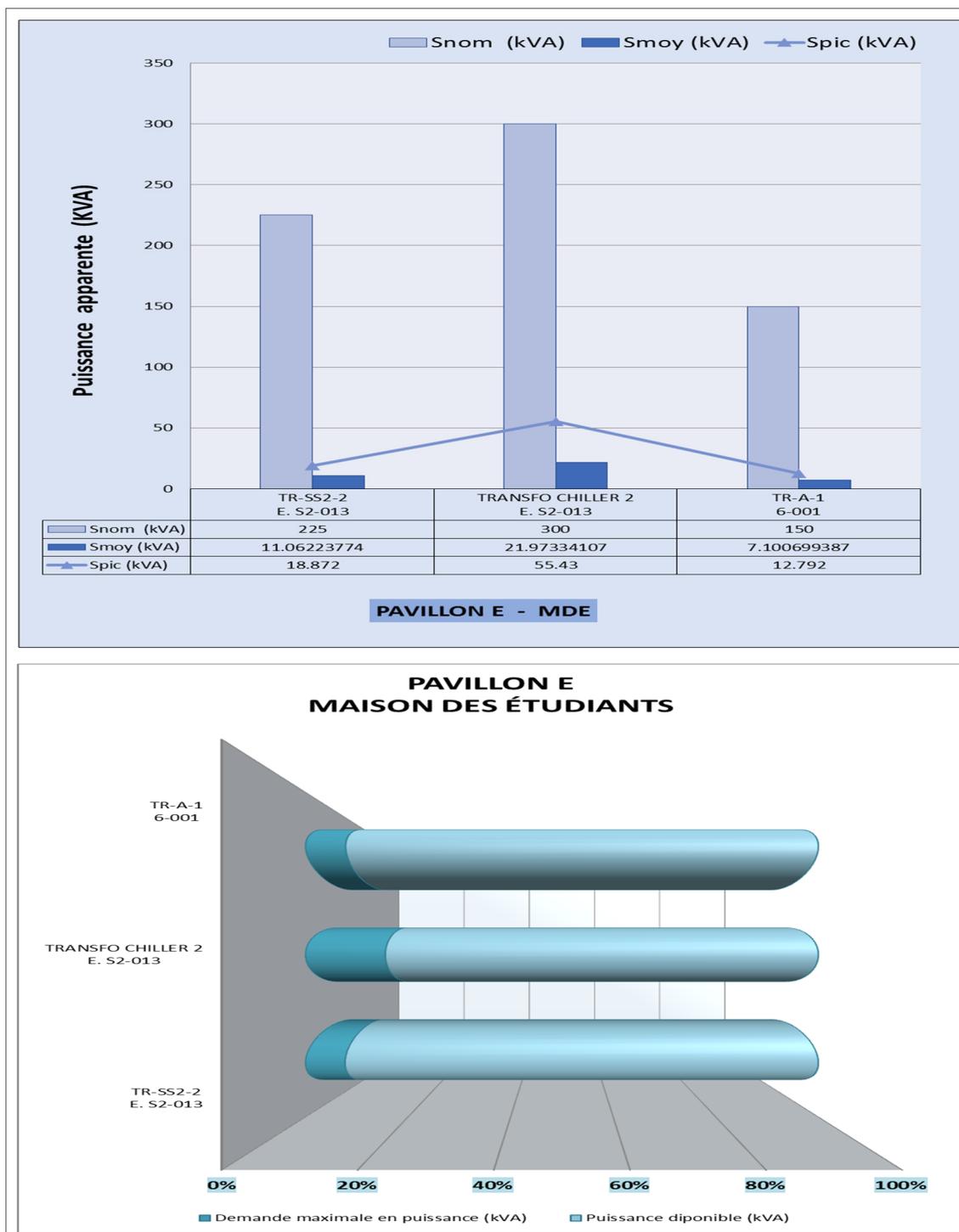


Figure 4.5 Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans le pavillon E

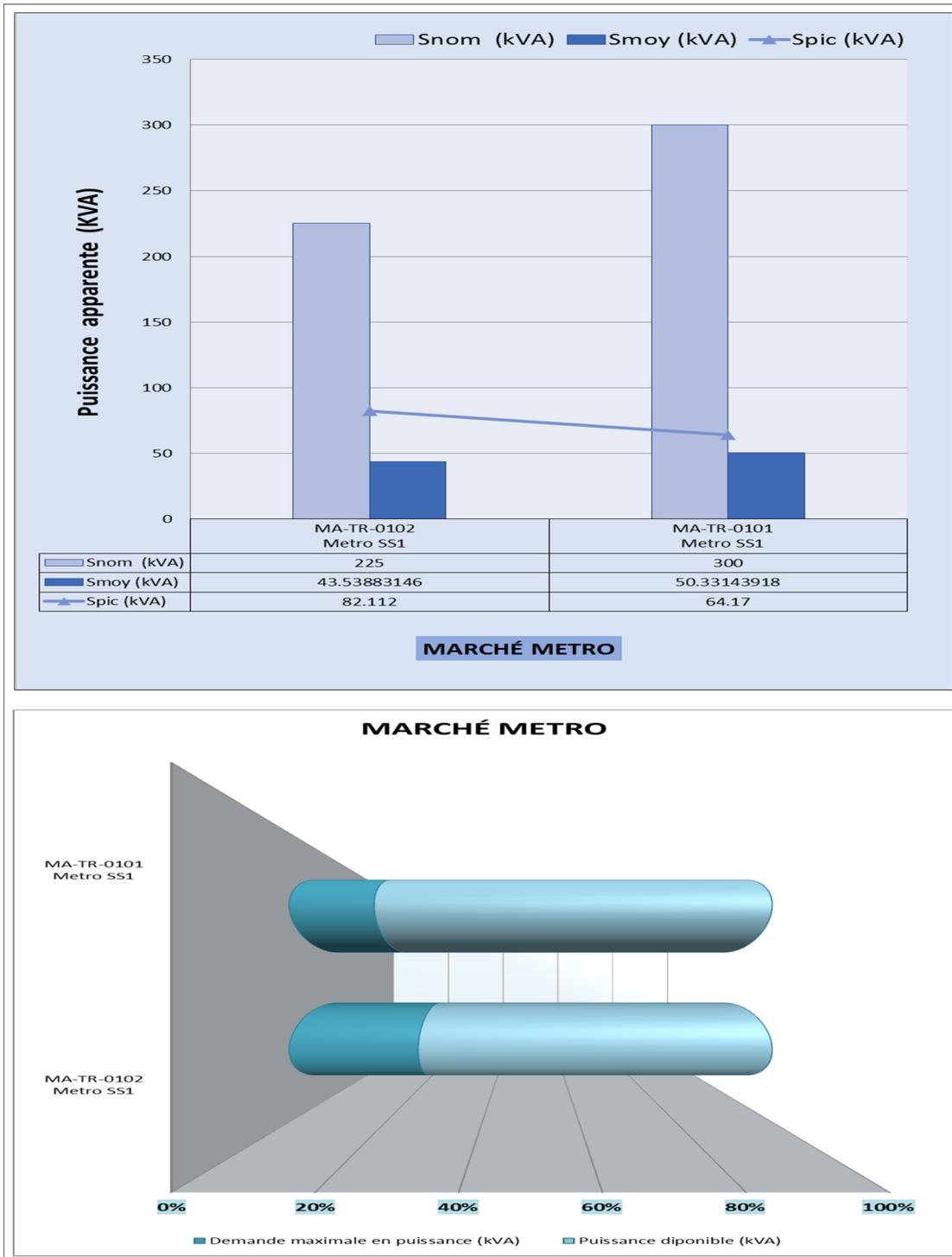


Figure 4.6 Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés au sous-sol de la résidence PH3 pour le marché Metro

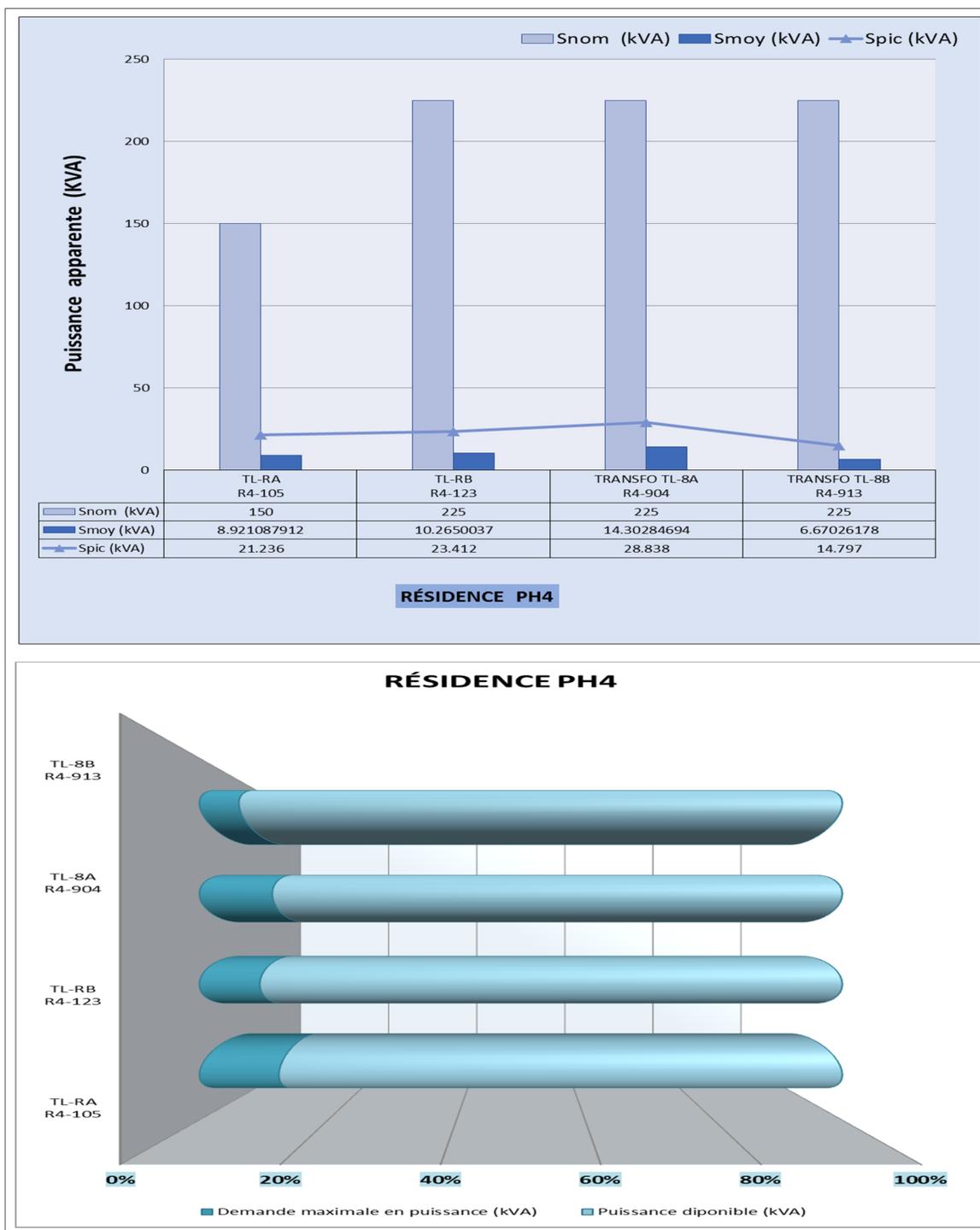


Figure 4.7 Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans la résidence PH4

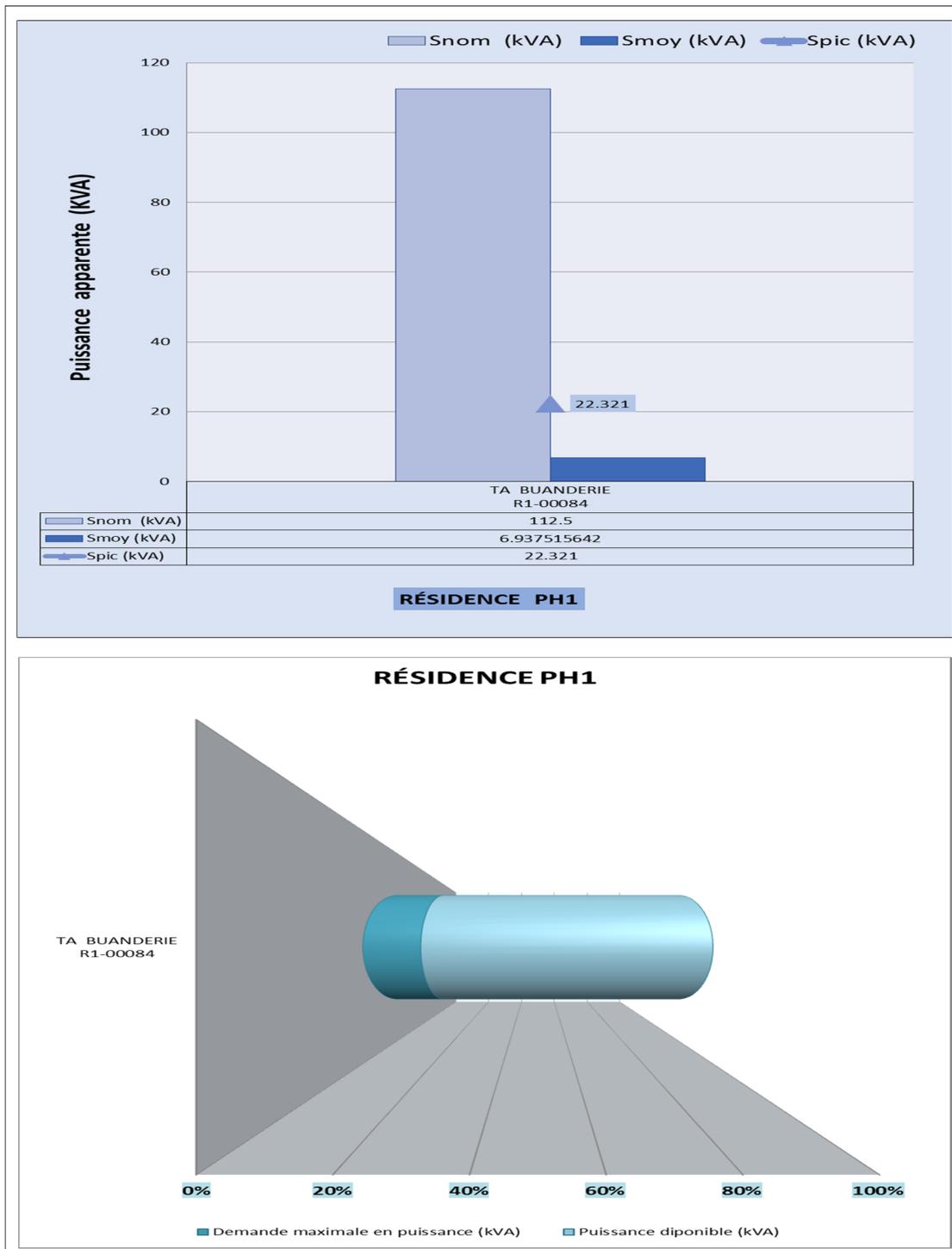


Figure 4.8 Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans la résidence PH1

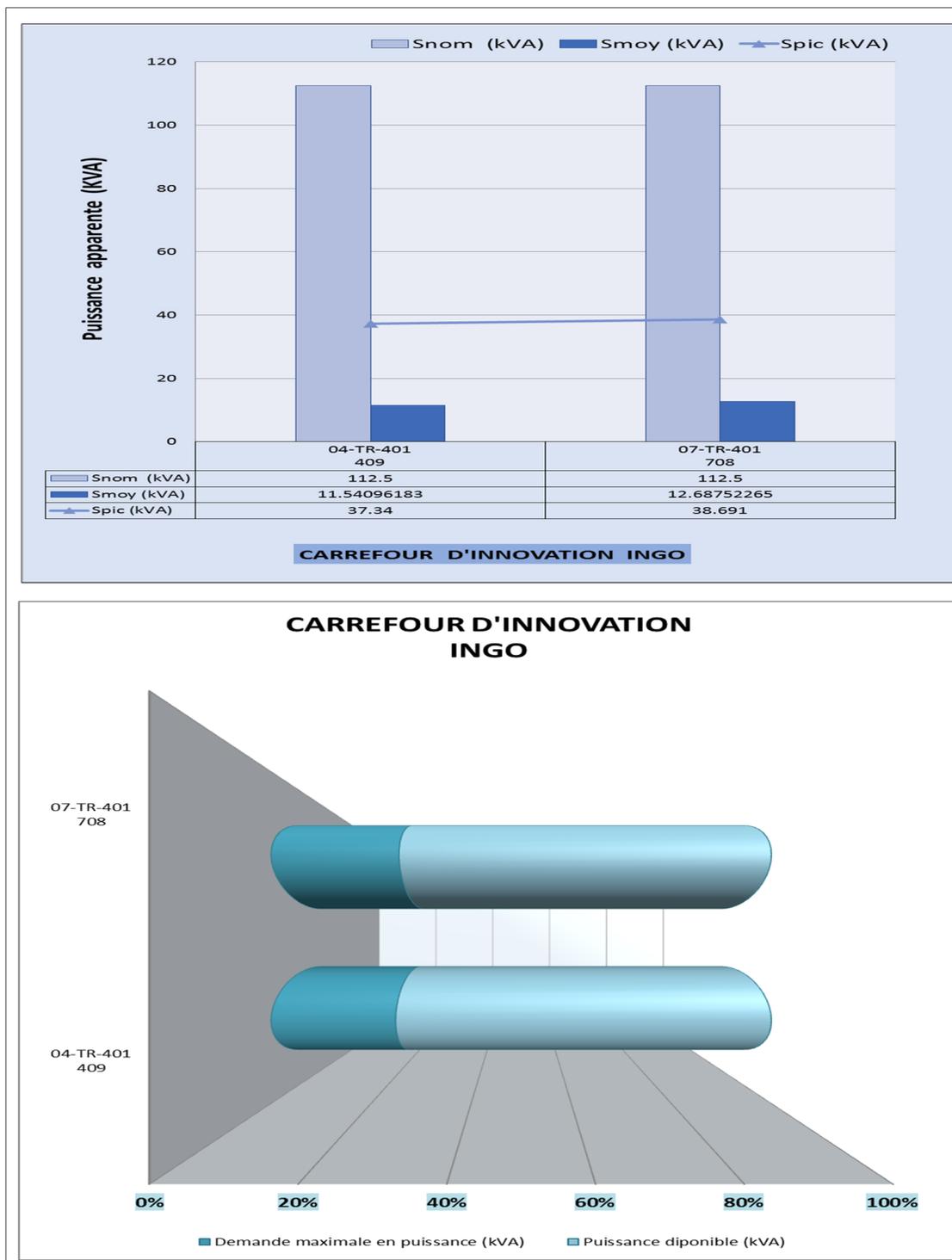


Figure 4.9 Diagramme des bilans des puissances apparentes des charges raccordées aux transformateurs installés dans INGO

Les diagrammes de puissances élaborés et présentés ci-dessus montrent clairement les bilans de puissances apparentes aux bornes des différentes charges installées dans tous les pavillons et bâtiments qui constituent le campus universitaire de l'ÉTS.

Ces diagrammes donnent les puissances moyennes et maximales calculées à partir des mesures en temps réel obtenues avec l'interface Vista Powerlogic et ce au niveau de chaque charge alimentée par tout transformateur de puissance apparente supérieure ou égale à 100kVA. Ces mesures figurent dans les tables présentées sur les diagrammes et qui donnent les valeurs exactes obtenues suite au calcul effectué des valeurs moyennes et maximales des puissances apparentes après avoir transféré les mesures obtenues en temps réel avec le logiciel Vista sur des fichiers XL.

En plus des puissances moyennes et maximales mesurées aux bornes des charges raccordées aux transformateurs de 100kVA et plus, ces diagrammes donnent aussi les puissances apparentes nominales des transformateurs qui alimentent ces charges installées sur le réseau électrique de l'ÉTS. Par la suite, avec toutes ces données, il est possible de comparer la demande en puissance en temps réel de chaque charge par rapport à la puissance disponible et fournie par le transformateur.

En effet, comme nous pouvons le constater sur les bilans de puissances obtenus, pour la majorité des charges installées dans les différents pavillons et bâtiments du campus universitaire, la puissance disponible et fournie par chaque transformateur qui alimente chacune de ces charges est beaucoup trop élevée par rapport à la consommation ces dernières en termes de puissance moyenne et même maximale.

De plus, pour mieux voir cette constatation, nous avons élaboré autres diagrammes qui montrent clairement le pourcentage de la puissance apparente maximale en temps réel absorbée par chaque charge par rapport à la puissance fournie par les transfos alimentant ces charges et ce pour tout le campus.

En effet, ces diagrammes permettent de comparer la demande en temps réel des différentes charges en termes de puissances par rapport à la puissance que peut fournir les transformateurs qui alimentent ces différentes charges, autrement dit, ils permettent d'examiner le dimensionnement des transformateurs installés sur le réseau électrique du campus universitaire.

D'après les diagrammes présentés ci-dessus, il est clair que pour la majorité des pavillons et bâtiments qui constituent le campus de l'ÉTS, le pourcentage d'utilisation des transformateurs de 100kVA et plus pour l'alimentation des différentes charges est très faible. Par exemple, si nous prenons le pavillon A, la figure 4.1 ainsi que la figure 4.2 montrent que le rapport de la consommation maximale en temps réel des charges par la puissance maximale fournie par les transformateurs qui les alimentent, ce pourcentage ne dépasse pas 46%, tel que les pourcentages maximaux et qui sont égales à 45.349% et 45.44% apparaissent respectivement aux niveaux des charges alimentées par les deux transformateurs T2-A-3548 et T2-A-3502. Ces derniers, comme c'était mentionné dans les deux chapitres précédents, alimentent principalement les cabines des serveurs installés au 3^{ème} étage du pavillon A dans A-3550. Quant au reste des charges installées dans le pavillon A, les pourcentages de leur consommation en temps réel par rapport à la puissance disponible et fournie par les transformateurs, varient entre 2.564% et 32.6302%.

Ensuite, ces pourcentages sont assez élevés pour les transfos CLUMEQ tel qu'ils varient entre 26.78% et 54.37% ce qui est logique puisqu'ils alimentent les serveurs CLUMEQ. Cependant, ce n'est pas le cas pour les charges alimentant le pavillon B vu que les pourcentages varient entre 15.1653% et 23.0676% ce qui montrent que les transformateurs du pavillon B sont assez surdimensionnés. Ce surdimensionnement est prononcé également d'une au niveau des transformateurs alimentant la maison des étudiants tels que les pourcentages de leur utilisation sont entre 8.4% et 18.5%, de deux aux bornes des transformateurs alimentant la résidence PH4 qui leurs pourcentages d'utilisation varient entre 6.577% et 14.1573%, ainsi que les transformateurs alimentant la résidence PH1 avec un

pourcentage qui ne dépasse pas 19.841%. Pour finir, le rapport de la consommation maximale en temps réel des charges par la puissance maximale fournie par les transformateurs varie entre 21.39% et 36.4942% pour les charges installées dans le marché Metro et entre 33.1911% et 34.392% pour les charges installées dans le carrefour d'innovation INGO.

En résumé, en se basant sur les différents diagrammes de bilans de puissances présentés dans ce paragraphe, il est clair que la majorité des transformateurs qui sont raccordés au réseau électrique de l'ÉTS sont surdimensionnés. Ce surdimensionnement risque par la suite d'engendrer l'augmentation des pertes au sein de l'installation électrique ce qui peut engendrer encore une augmentation des coûts liés aux factures d'électricité ce qui s'avère une perte d'argent pour l'ÉTS, mais pourrait aussi nuire à la continuité de service tout en affectant l'efficacité de la réponse des équipements de protection comme par exemple les relais.

En plus du problème de surdimensionnement des transformateurs, ces diagrammes vont servir de sortes maquettes ou plateformes qui permettent d'obtenir la consommation en temps réel des charges alimentées par les transformateurs ayant des puissances apparentes nominales supérieures ou égales à 100kVA et installées dans les différents pavillons et bâtiments qui constituent tout le campus universitaire de l'ÉTS.

Ces maquettes ainsi obtenues offrent d'une part une vision plus claire sur le comportement en temps réel de l'intégralité de l'installation électrique du campus et d'autre part des données de consommation en temps réel obtenus aux niveaux de toutes les charges alimentées par les transformateurs de grandes puissances. Ces données permettront par la suite d'effectuer le choix optimal parmi ces transformateurs aux bornes desquels il est possible d'installer n'importe quelle charge tout en s'assurant de ne pas surcharger le réseau électrique de l'ÉTS et ainsi Hydro Québec, ce qui assure l'amélioration de la performance de l'installation électrique et de la qualité de l'onde.

En conséquence, dans le paragraphe suivant de ce chapitre, nous allons nous servir des données offertes par les diagrammes vus précédemment afin de choisir les transformateurs aux niveaux desquelles il serait possible d'installer un exemple de station de recharge pour les voitures électriques tout en évitant de surcharger les transformateurs considérés et l'intégralité du réseau électrique du campus universitaire.

4.2 Exemple d'installation d'une station de recharge pour les véhicules électriques sur le réseau électrique du campus de l'ÉTS

En se basant d'une part sur le schéma de simulation de l'installation électrique de l'ÉTS élaboré avec MATLAB/SimPowerSystems (SPS et présenté dans le dernier paragraphe du troisième chapitre, et d'autre part sur l'analyse et l'interprétation des résultats présentées dans les paragraphes précédents de ce chapitre, et plus précisément les bilans de puissances élaborés précédemment, il est possible d'effectuer dans ce cas le choix optimal des transformateurs où il serait possible d'introduire un exemple de charge.

En effet, les bilans de puissances montrent les puissances maximales en temps réel absorbées par les différentes charges raccordées au réseau électrique et permettent de les comparer par rapport à la puissance fournie par les transformateurs. Dans ce cas, le choix des transformateurs peut être effectué pour l'introduction de n'importe quel type de charge, tout en évitant de trop surcharger le réseau électrique de l'ÉTS. Il sera possible de voir par la suite l'impact de cette introduction d'une telle charge sur le réseau électrique.

Dans ce contexte, nous allons présenter dans ce paragraphe un exemple de raccordement d'un profil de charge pour les véhicules électriques au réseau électrique de l'ÉTS, tout en simulant avec MATLAB/ SimPowerSystems (SPS) l'impact de l'installation de ce profil de charge pour des véhicules électriques de niveau 3, et ce via les transformateurs choisis suite aux données présentées par les bilans des puissances.

Ainsi, nous proposons comme choix trois transformateurs installés dans trois pavillons du campus universitaire de l'ÉTS qui sont les transformateurs TPP1R, RC-TR-01 et TR-SS2-2 installés respectivement dans les pavillons A, B et E. Le choix particulier de ces transformateurs est dû à plusieurs facteurs tels que le fait que ces transformateurs alimentent déjà des bornes de recharges pour les véhicules électriques mais aussi le fait qu'ils présentent un rapport d'utilisation très faible se manifestant par le pourcentage faible obtenu en effectuant le calcul du rapport des puissances maximales absorbées par les charges alimentées par ces trois transformateurs par les puissances fournies par ces derniers ainsi choisis. En effet, ces pourcentages calculés et présentés dans le paragraphe précédent de ce chapitre sont comme suit : 2.564% pour le transformateur TPP1R et 23.0675% pour le transformateur RC-TR-01 localisé dans B-0102 et 8.375% pour le transformateur TR-SS2-2 installé dans E.S2-013. Autrement dit, si nous calculons la puissance apparente disponible et que peut fournir chacun de ces trois transformateurs, tout en tenant compte du maximum de puissance que peut absorber la totalité de charge déjà présente et alimentée par ces transformateurs choisis, nous obtenons 219.231kVA pour le transformateur TPP1R, 86.549kVA pour RC-TR-01 et 206.128kVA pour TR-SS2-2.

Ainsi, les trois transformateurs choisis ont assez de puissance disponible pour installer trois stations de recharge pour les véhicules électriques sur le réseau électrique de l'ÉTS. Cependant, les trois stations de recharge qui nous intéressent et que nous voulons installer sur le réseau électrique possèdent une puissance totale égale à 300kVA. En effet, dans le besoin futur de l'ÉTS, nous estimons que la puissance nominale d'une seule station de recharge est de 100kW, ce qui est équivalent à 100kVA si nous parlons en terme de puissance apparente puisque cette dernière est l'image de la puissance active en kW. Ainsi, si nous choisissons de répartir cette puissance totale équitablement au niveau des trois transformateurs, soit 100kVA par station de recharge par pavillon, le transformateur RC-TR-01, même s'il possède des bornes de recharge pour les véhicules électriques, serait un mauvais choix pour connecter une station de recharge avec une puissance aussi importante.

Dans ce cas, nous aurons trois solutions à considérer; la première serait de répartir de manière inégale la puissance totale des stations de recharge que nous visons à installer tel que nous pouvons installer une première station de recharge de 150kVA aux bornes du transformateur TPP1R, 50kVA au niveau du transformateur RC-TR-01 et 100kVA aux bornes du transformateur TR-SS2-2. La deuxième serait de répartir la puissance totale égale à 300kVA équitablement et uniquement au niveau des deux transformateurs TPP1R et TR-SS2-2 puisque comme c'était mentionné précédemment ces deux transformateurs sont capables de fournir respectivement des puissances égales à 219.231kVA et 206.128kVA.

Quant à la troisième solution, elle s'agit de choisir un transformateur autre que RC-TR-01 aux bornes duquel il serait possible de connecter une station de recharge de 100kVA et pareillement pour les deux autres transformateurs. Dans ce cas, si nous continuons avec le pavillon B, nous pouvons proposer comme transformateur le 01-TR-01 installé dans B-1102 avec un pourcentage d'utilisation égale à 17.0686% et qui est capable de fournir 124kVA mais qui n'alimente malheureusement pas des bornes de recharge pour les véhicules électriques déjà installées et prêtes à utiliser.

Dans notre cas, nous allons opter pour la deuxième solution qui s'agit de se contenter d'installer deux stations de recharge pour les véhicules électriques de 150kVA, et ce aux bornes des deux transformateurs TPP1R et TR-SS2-2 installés respectivement dans les deux pavillons A et E.

Ainsi, pour tester l'installation de ces deux stations de recharge au niveau des deux transfos choisis et avant de procéder à la simulation de l'installation électrique tout en connectant ces véhicules électriques, nous avons effectué une recherche de profils de charges pour des véhicules électriques assez fréquents sur le marché, et nous avons réussi à trouver ceux de deux véhicules électriques de type Nissan Leaf et BMW i3. Ces profils de charges sont présentés comme suit :

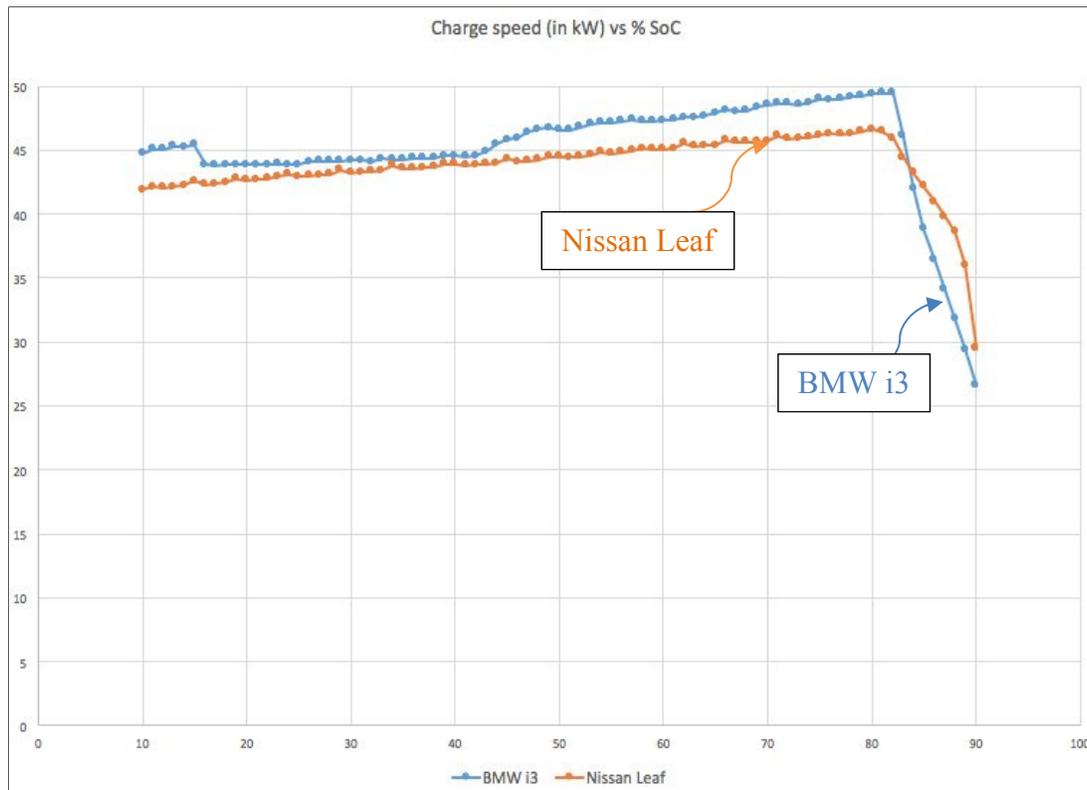


Figure 4.10 Profil de charge pour les deux véhicules électriques de type BMW i3 et Nissan Leaf

Tirée de 33 kWh BMW i3 VS 30 kWh Nissan LEAF fast charging comparison (2017)

La figure 4.10 présente le profil de charge pour deux types de véhicules électriques, la BMW i3 et la Nissan Leaf. Pour pouvoir intégrer ces véhicules au sein du réseau électrique de l'ÉTS, nous avons prélevé à partir des courbes tracées ci-dessus, les coordonnées correspondantes aux puissances en kW représentant l'axe des ordonnées et la durée de charge en minutes de ces véhicules représentant l'axe des abscisses. Ensuite nous avons introduit ces valeurs obtenues sur un fichier XL et nous avons imaginé et construit un profil de charge qui se traduit comme suit : dans un premier temps, nous avons intégré uniquement le véhicule de type Nissan Leaf pour se charger pendant une durée de 90 minutes et qui atteint un maximum de puissance de charge égale à 47.1kW près. Ensuite, à 90 minutes à compter du début de durée de charge de la Nissan Leaf, nous avons connecté en plus de cette dernière le véhicule électrique de type BMW i3 ce qui se traduit par la sommation des deux puissances des deux

véhicules ; cela a duré pareillement 90min pour atteindre un maximum de puissance égale 50kW près. A 180 minutes, nous avons débranché la Nissan Leaf tout en gardant la BMW i3 connectée au réseau.

La figure 4.11 donne les résultats de simulation du profil de charge construit et mentionné ci-dessus des deux véhicules électriques étudiés.

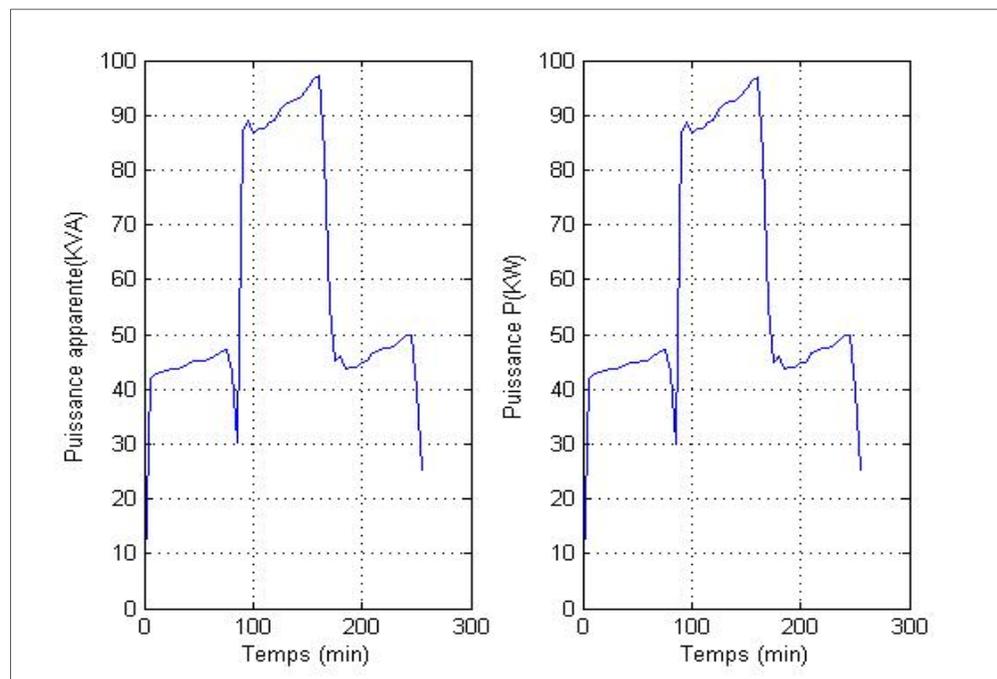


Figure 4.11 Schéma de simulation du profil de charge construit des véhicules électriques Nissan Leaf et BMW i3

Notons que le profil de charge des deux véhicules donnés par la figure 4.10 présente le cas où ces deux véhicules, Nissan Leaf et BMW i3 ont été chargés par un chargeur rapide qui est le ABB T53 CJG fast chargers.

Ce profil de charge ainsi imaginé et construit est introduit par la suite dans MATLAB grâce à un code qui sera inclus dans le fichier m.file de simulation de tout le campus et qui sera

présenté dans l'ANNEXE III et puis dans SimPowerSystems (SPS) dans le schéma de simulation du réseau électrique. Comme c'était mentionné précédemment, nous connecterons ces exemples de véhicules électriques aux bornes des transformateurs TPP1R dans le pavillon A et TR-SS2-2 dans le pavillon E comme le montre les deux figures 4.12 et 4.13.

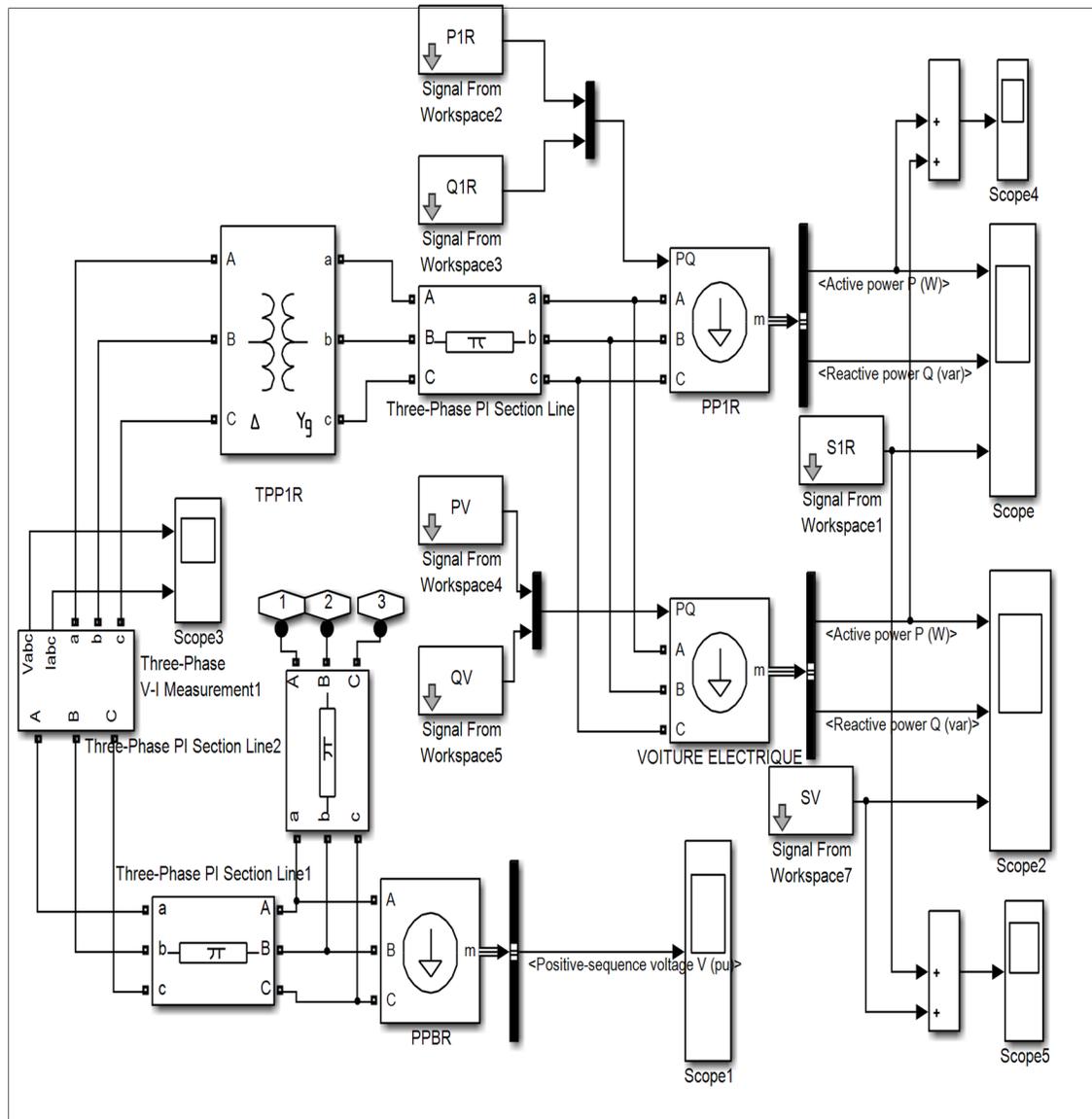


Figure 4.12 Schéma SimPowerSystems (SPS) de l'introduction du profil de charge des véhicules électriques Nissan Leaf et BMW i3 aux bornes du transfo TPP1R

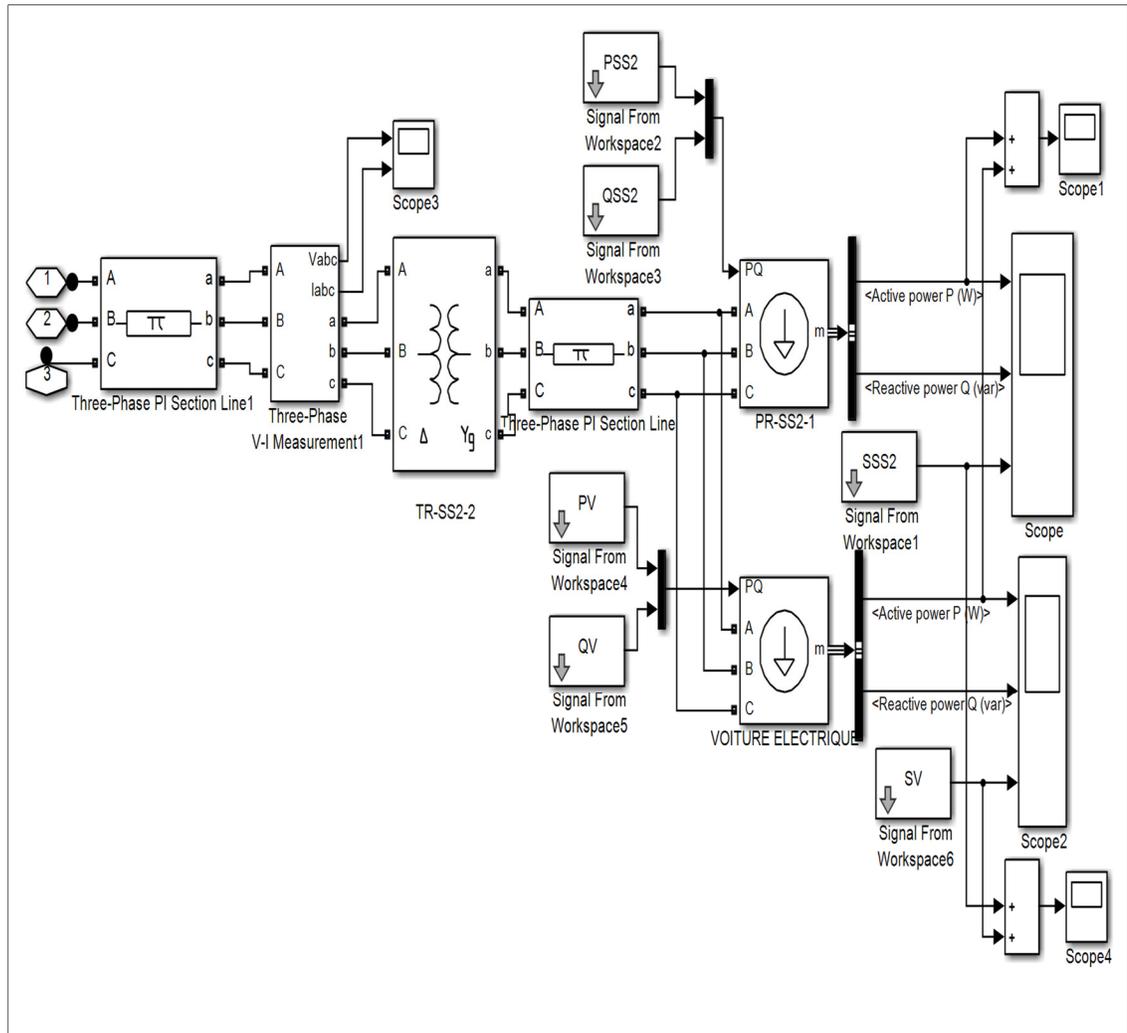


Figure 4.13 Schéma SimPowerSystems (SPS) de l'introduction du profil de charge des véhicules électriques Nissan Leaf et BMW i3 aux bornes du transformateur TR-SS2-2

Comme nous pouvons le voir sur les deux schémas de simulation, nous avons introduit le profil de charge construit précédemment des deux véhicules au niveau du transformateur TPP1R tel que rappelons qu'il est installé dans A-0350 et alimente le panneau PP1R et le transformateur TR-S22-2 localisé dans E.S2-013 et qui alimente le panneau TR-SS2-1. Ce dernier ainsi que le panneau PP1R alimente plusieurs charges qui ont été énumérées en détails dans le premier paragraphe du deuxième chapitre dont essentiellement nous pouvons mentionner des bornes de recharge pour les véhicules électriques. Ainsi, grâce aux deux

schémas de simulation, il nous est possible de visualiser d'un côté le profil de charge pour les deux véhicules ainsi que le profil de la puissance totale obtenu suite à l'introduction des deux véhicules Nissan Leaf et BMW i3 sur le réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS.

Nous présentons dans ce contexte les figures des résultats de simulation traduisant l'évolution de puissance de la charge totale au niveau des deux transformateurs TPP1R et TR-SS2-2 suite à l'intégration de la charge de deux véhicules électriques qui comme nous l'avons mentionné auparavant sont supposés être chargés par un chargeur rapide qui est le ABB T53 CJG fast chargers comme l'a indiqué R. Van der Put. (2017).

Nous présentons ainsi l'évolution des puissances active en kW et apparente en kVA de la totalité de la charge résultante du raccordement du profil de charge des véhicules électriques de niveau 3 donné précédemment par la figure 4.11 au réseau électrique du campus universitaire de l'ÉTS.

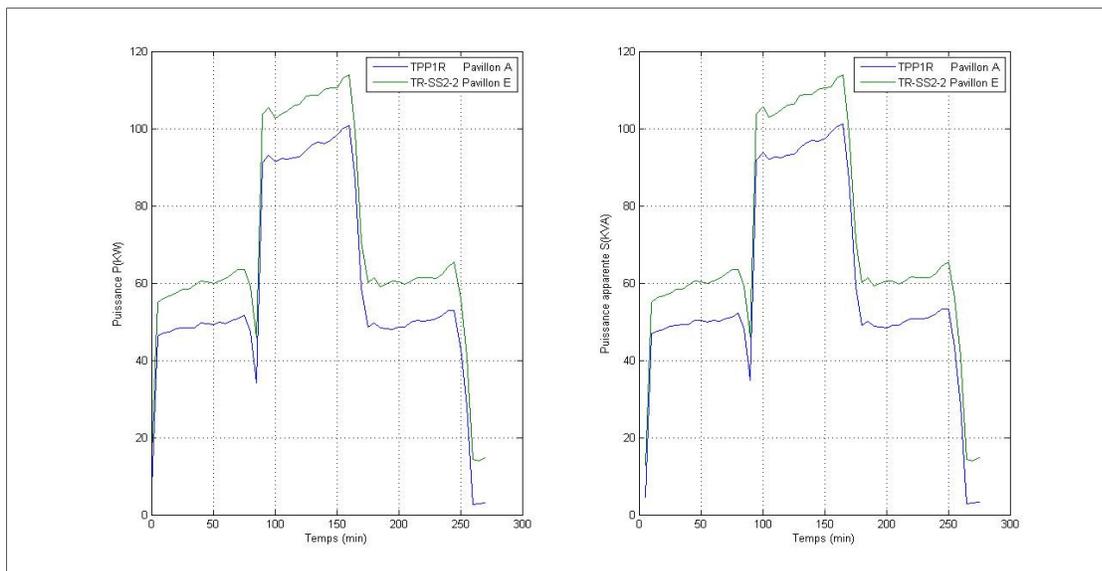


Figure 4.14 Schéma de simulation du Bilan de puissances de la totalité de charge aux bornes des transformateurs TPP1R et TR-SS2-2 suite au raccordement du profil de charge des véhicules électriques

Comme le montre la figure 4.14, avant d'introduire le profil de charge pour les véhicules électriques pris comme exemples pour cette étude, la charge des transformateurs TPP1R et TR-SS2-2 était égale respectivement à presque 5kVA et à 13kVA telles que ces valeurs représentent la charge respective des panneaux PP1R et PR-SS2-2. Ensuite, dès le raccordement des véhicules électriques au réseau, la charge totale évolue en sommant le profil de charge des panneaux obtenu suite aux mesures en temps réel de l'évolution de puissance en fonction du temps pour chaque transformateur et le profil de charge pour les véhicules électriques Nissan Leaf et BMW i3 donné précédemment par la figure 4.11 et qui comme nous l'avons mentionné auparavant s'agissant de charges de niveau 3 et étaient chargés par un chargeur rapide.

De plus, il est clair que pour le cas des deux transformateurs TPP1R et TR-SS2-2 au niveau desquels en plus de la charge des panneaux PP1R et PR-SS2-1 qu'ils alimentent respectivement nous avons connecté la charge des véhicules électriques de niveau 3 qui sont la Nissan Leaf et la BMW i3, la charge totale résultante ne dépasse 101.2kVA aux bornes du transformateur TPP1R et 114kVA au niveau du transformateur TR-SS2-2 alors que chacun d'entre ces transformateurs est capable de fournir 225kVA.

En conclusion, même avec l'intégration de la station de recharge pour l'exemple de profil de charge des véhicules électriques ainsi choisi et tel que pour se charger ils consomment tous les deux réunis d'après la figure 4.14 un maximum de puissance apparente égale à 97.11kVA, le transformateur continue à alimenter le panneau PP1R qui lui est connecté ainsi que la station de recharge d niveau 3 qui lui a été rajoutée.

D'où, le choix des transformateurs est bien réussi et la solution pour laquelle nous avons opté qui est de connecter une station de recharge de niveau 3 dont la puissance apparente est égale à 300kVA en répartissant cette dernière équitablement sur les deux transformateurs TPP1R et TR-SS2-2 semble bien fructueuse puisque nous avons réussi à ne pas surcharger les deux

transformateurs choisis tout en s'assurant qu'ils continuent à alimenter la charge totale qui leur a été attribuée.

D'autre part, grâce au schéma de simulation élaboré, il est toujours possible d'opter pour les deux autres solutions proposées au début de ce paragraphe et même pour autres choix de transformateurs et de tester et simuler ainsi l'installation du même profil de charge choisi pour les véhicules électriques qui ont été pris comme exemple. Ou même un autre profil de charge pour d'autres types de véhicules électriques, et voir l'impact d'un tel rajout sur le réseau électrique de l'ÉTS afin de s'assurer de ne pas trop surcharger ce dernier tout en assurant ainsi la continuité de service.

CONCLUSION

Pour assurer un meilleur rendement d'une installation électrique donnée, il est important de travailler sur la maintenance continue des équipements qui lui sont raccordés. Cependant, avant de considérer et entamer le processus de maintenance pour ces équipements, il faut tout d'abord chercher à comprendre et investiguer les causes qui ont pu mener leur dégradation vis-à-vis de la qualité et la performance. C'est dans ce contexte que le travail présenté dans ce mémoire a été effectué.

En effet, pour pouvoir étudier et tester de près l'installation électrique du campus universitaire de l'ÉTS, une identification des différents équipements qui constituent l'installation électrique considérée y compris les transformateurs et les charges qu'ils alimentent et des mesures en temps réel ont été réalisées au niveau de ces charges qui sont raccordées au réseau électrique et telles qu'elles été limitées aux charges connectées aux transformateurs alimentant le réseau de l'ÉTS et possédant une puissance assez importante de 100kVA et plus. Ainsi, les résultats des mesures effectuées ont pu mettre en avance les différents aspects et caractéristiques de la qualité de l'onde produite et circulant au sein de l'installation électrique de tout le campus. Cette qualité de l'onde se qualifie du fait qu'elle est affectée de plusieurs formes de perturbations qui se manifestent par des harmoniques de tensions dont le taux respecte la limite imposée par le fournisseur d'énergie Hydro-Québec mais aussi par des harmoniques de courants dont le taux est très élevé et dont le spectre harmonique pour la majorité des charges montre la génération des harmoniques de fréquences multiples notamment l'harmonique de rang 3. De plus, ces perturbations se manifestent de même par un déséquilibre de tensions et courants des charges et qui a été observé mais prononcé essentiellement du côté des courants où le déphasage de 120° est loin d'être respecté et les amplitudes des courants de phases sont non seulement inégales mais possèdent en plus des valeurs correspondantes au double ou même parfois au triple l'une par rapport aux autres si nous comparons les trois phases de ces courants.

Toutes ces perturbations mentionnées et qui affectent la qualité de l'onde qui circule dans le réseau électrique de l'ÉTS affecte en conséquence les équipements raccordés au même réseau. En effet, suite au taux élevé des harmoniques des courants, les équipements seront face d'une part au problème d'échauffement ce qui pourrait résulter en d'autres complications comme le risque d'interférence avec les réseaux de télécommunication ce qui peut nuire aux équipements de protection de l'installation électrique et risque même d'entraîner le problème de résonance. Et d'autre part, les équipements risquent de faire face à des problèmes de vibrations qui entraineront à la longue l'usure mécanique précoce des équipements ce qui pourrait engendrer non seulement l'apparition des harmoniques de tensions mais aussi des problèmes de surdimensionnement des équipements.

Dans ce contexte, le problème de surdimensionnement a été déjà démontré dans le quatrième chapitre au niveau de la majorité pour ne pas dire tous les transformateurs de 100kVA et plus raccordés au réseau électrique de l'ÉTS. Dans ce cas, il y a un risque d'engendrer des pertes au sein de l'installation électriques ce qui risque d'augmenter le coût de l'énergie électrique que doit compenser l'ÉTS mais aussi de nuire d'une part à la performance des équipements de protection comme les relais et d'autre part au câblage.

En plus des harmoniques, les équipements peuvent être affectés par les autres formes de perturbations qui touchent la qualité de l'onde et qui s'agissent des courants de charge déséquilibrés. D'un côté, le déséquilibre des courants a pour conséquences, comme c'était mentionné au début de la conclusion, de générer les harmoniques de rang 3 et qui s'ils persistent il y a un grand risque de surcharge du neutre jusqu'à même provoquer sa rupture et ainsi un incendie au niveau de l'installation. D'un autre côté, ce déséquilibre pourrait aussi engendrer l'échauffement et le vieillissement des équipements ce qui entrainera par la suite la dégradation de l'efficacité énergétique de l'intégralité de l'installation électrique de l'ÉTS.

Tous les risques mentionnés ci-dessus nous urgent à remédier à ces différentes anomalies découvertes au sein de l'installation électrique de l'intégralité du campus universitaire et ce

grâce aux mesures expérimentales et en temps réel réalisées dans le travail présenté dans ce mémoire. Ainsi, en identifiant les problèmes que l'installation électrique de l'ÉTS témoigne, il est possible maintenant de proposer les solutions qui pourraient améliorer la qualité de l'onde et même de procéder au processus de maintenance préventive et corrective des différents équipements raccordés à cette installation.

D'autre part, grâce à l'identification des différents équipements qui constituent l'intégralité du réseau électrique du campus universitaire et aux mesures expérimentales réalisées en temps réel afin de mettre en relief le profil réel des charges alimentées par les transformateurs de grandes puissances, le travail qui a été élaboré dans ce mémoire offre une plateforme qui représente le reflet en temps réel du comportement de l'installation électrique du campus universitaire. En conséquence, il serait possible dorénavant de voir où nous pourrions effectuer l'intégration de n'importe quel type de charge et tester ainsi son impact sur le réseau électrique tout en s'assurant de ne pas trop surcharger l'installation afin de veiller à préserver et améliorer la performance et la qualité du service qu'offre le réseau électrique de l'ÉTS.

RECOMMANDATIONS

Comme nous l'avons pu conclure précédemment, il est clair que l'installation électrique du campus universitaire de l'ÉTS nécessite une maintenance à la fois corrective et préventive.

En effet, cette maintenance visera en premier lieu la qualité de l'onde, et ce en optant pour des solutions qui permettent de compenser les harmoniques des courants afin d'éviter le risque du problème de résonance qui pourrait apparaître en conséquence de l'échauffement des équipements qui subissent la circulation des harmoniques de courants.

De plus, compenser ces harmoniques en les réduisant ou en les éliminant permet d'assurer la prévention de leur passage à travers les impédances car au cas où cette maintenance préventive ne s'effectue, un tel passage risque de générer des harmoniques de tensions de taux assez élevé.

Dans ce cas, pour éliminer les harmoniques des courants nous pouvons suggérer comme solution de réduire l'impédance des câbles tout en augmentant la section qui est considérée comme une solution pas très évidente pour les câbles qui sont déjà installés. La deuxième solution serait l'intégration de filtres passifs ou de compensateurs actifs comme ceux que nous avons mentionnés dans le premier chapitre. Et la troisième serait de rajouter au niveau des charges une inductance en position amant.

Ensuite, le fait de parvenir à compenser ces harmoniques de courants permet d'éviter de faire face aux problèmes de l'usure mécanique des équipements ce qui permet ainsi d'éviter les problèmes de surdimensionnement que nous avons déjà rencontré au niveau des transformateurs.

En parlant de surdimensionnement des transformateurs et sachant que ce problème a pour conséquences d'augmenter le coût d'énergie électrique que l'ÉTS doit couvrir suite à

l'augmentation des pertes, ce travail offre une solution pour essayer de compenser les dégâts et de réduire ainsi les factures de l'électricité. En effet, cela peut être réalisé en se référant à tous les bilans des puissances présentés dans le quatrième chapitre mais aussi à la plateforme conçue en tenant compte de toutes les données et mesures obtenues en temps réel et qui met en œuvre le comportement de l'intégralité de l'installation électrique du campus.

L'exploit de ces bilans de puissances et de cette plateforme peut être fait de plusieurs manières ; l'une de ces manières se manifeste par l'exemple de l'installation de la station de recharge pour les véhicules électriques. Effectivement, les bilans de puissances et la plateforme nous ont permis d'effectuer le choix optimal du transformateur via duquel il nous était possible d'introduire le profil de charge au réseau électrique sans surcharger ce dernier et voir l'impact d'une telle intégration sur l'installation de l'ÉTS. Notons que cette plateforme offre la possibilité de faire le même test pour n'importe quel type de charge et au niveau de n'importe quel type de transformateur. Ainsi, au lieu de perdre de l'argent et de ressources en se procurant de nouveaux transformateurs, utilisons les transformateurs qui sont déjà raccordés au réseau électrique de l'université et dont nous connaissons toutes les données et caractéristiques relatives.

En plus des solutions pour les harmoniques des courants, il faudrait remédier au problème de déséquilibre des charges prononcé essentiellement au niveau des courants puisque à la longue il risque d'une part de nuire à l'efficacité des appareillages assurant la protection de l'installation électrique et donc la dégradation du rendement énergétique de cette installation. Et d'autre part, de surcharger le neutre au point de causer sa rupture et ainsi un risque d'incendie au sein de l'installation électrique de l'ÉTS. Ainsi, pour remédier au problème de déséquilibre des charges, nous pouvons opter aussi pour le compensateur actif parallèle tel que nous avons mentionné des exemples de ce genre de compensateur dans le premier paragraphe du premier chapitre et qui permet de compenser non seulement le déséquilibre des courants mais aussi la puissance réactive.

Pour finir, pour le cas du travail réalisé dans ce mémoire, les mesures effectuées en temps réel ont été réalisées en se limitant aux transformateurs ayant une puissance apparente supérieure ou égale à 100kVA, ainsi il serait intéressant d'effectuer dans un deuxième temps les mêmes mesures aux bornes de tous les transformateurs installés sur l'intégralité du réseau électrique du campus universitaire.

Ensuite, il est vrai que les mesures en temps réel ont été récoltées aux bornes de chaque transformateur sur un axe de temps assez suffisant pour avoir une idée sur la consommation réelle de chaque charge. Que dire alors de la possibilité de pouvoir effectuer les mêmes mesures en temps réel mais de manière continue en tout temps. Pour ce faire, nous aurions besoin de deux types de ressources ; la première s'agit du logiciel, Vista Powerlogic de Schneider Electric, dont nous nous sommes servi pour effectuer ce travail présenté dans ce mémoire ce qui est déjà à notre disposition, et la deuxième c'est de connecter des capteurs aux niveaux des charges tels que nous pouvons suggérer les capteurs du type : Analog Current Transducer Hawkeye™ 721LC.

ANNEXE I

ESSAIS DE PRODUCTION POUR LES TRANSFORMATEURS T3, T4, T6

ESSAI DE PRODUCTION / PRODUCTION TEST				

KVA:	1250	RISE:	80 dc	DATE: 2004-09-03
PRI:	24940 Y	PHASE:	3	# W.O.: 158520
SEC:	600 Y	Hz:	60	PROJET: Université du Québ
TYPE:	CXTA1250 S003574	# SER.:	XNH-0001-158520	REP: GE Ind.System, Mis
COUPLAGE / PHASE RELATION:		Yy0		
RAPPORT DE TENSION / VOLTAGE RATIO:	PRISE TAP	H0-H1 X0-X1	H0-H2 X0-X2	H0-H3 X0-X3
	3-4 :	26187 Volts	43.71	43.71
	2-4 :	25564 Volts	42.64	42.64
	2-5 :	24940 Volts	41.63	41.63
	1-5 :	24317 Volts	40.60	40.60
	1-6 :	23693 Volts	39.53	39.53
RESISTANCE A / AT:	23.2 dc			
SEC :	X1-X2:	1.0825 mOhm	X1-X3:	1.1288 mOhm
	X2-X3:	1.123		
PRI :	H1-H2:	3447 mOhm	H1-H3:	3439 mOhm
	H2-H3:	3438		
PERTES A VIDE ET COURANT D'EXCITATION				
/ NO LOAD LOSSES AND EXCITING CURRENT:				
A 100% de la tension nominale:		5234 Watts	1.29 % Inom	
At 100% rated voltage:				
PERTES EN CHARGE / LOAD LOSSES:				
Avec prise haute tension a 100%:		7870 Watts	mesures a / mesured at	23.3
With high voltage tap at 100%:		9684 Watts	corriges a / corrected at	100
Page 1/2				

Figure-A I-1 Essai de production pour le transformateur T3 première partie
Tirée de Général Électrique (2004, p.1)

ESSAI DE PRODUCTION / PRODUCTION TEST

KVA: 1250	RISE: 80 dC	DATE: 2004-09-03
PRI: 24940 Y	PHASE: 3	# W.O.: 158520
SEC: 600 Y	Hz: 60	PROJET: Université du Québec, ETS
TYPE: CXTA1250 S003574	# SER.: XNH-0001-158520	REF: GE Ind.System, Miss.

IMPEDANCE:

Mesure a / measured at: 23.3 dC	IR: 0.63%	IX: 6.92%	IZ: 6.95%
Corrigée a / corrected at: 100 dC	IR: 0.77%	IX: 6.92%	IZ: 6.96%

ESSAIS DIELECTRIQUES / DIELECTRIC TESTS

A) TENSION APPLIQUEE / APPLIED HIGH VOLTAGE TEST:

BT / LV - (HT et noyau a la terre / HV and core grounded):	4000 Volts (60 Hz, 1 min test)
HT / HV - (BT et noyau a la terre / LV and core grounded):	40000 Volts (60 Hz, 1 min test)

B) TENSION INDUITE / INDUCED HIGH VOLTAGE TEST:

Les bornes basse-tension alimentees avec le double de la tension nominale
Supplied low voltage terminals with twice the rated voltage

300 Hz, durant / during 24 sec.

ISOLATION DU NOYAU / CORE INSULATION:

10 GOhm à / at 1000 Vdc

Redige par / Written by: XXXXXXXXXX

Approuve par/ Approved by: XXXXXXXXXX

Page 2/2

Figure-A I-2 Essai de production pour le transformateur T3 deuxième partie
Tirée de Général Électrique (2004, p.2)

ESSAI DE PRODUCTION / PRODUCTION TEST									
KVA :	2500	ANN			"C RISE :	150	DATE :	2008-02-15	
PRI :	24940	Y	125	kV BIL	PHASE :	3	W.O. # :	177274	
SEC :	600	Y	10	kV BIL	Hz :	60	PROJ :	ETS RÉSIDENCES ÉTUDIANTES	
Distinct Mod # :	CX3C2500 S007046				SER # :	XRA-0001-177274	REF :	GE Consumer & Industrial	
GENERAL MOD # :	E-CX3C2500 S007046-001								
COUPLAGE PHASE RELATION		Yy0							
RAPPORT DE TENSION VOLTAGE RATIO		Prise Tap		H0-H1 X0-X1		H0-H2 X0-X2		H0-H3 X0-X3	
	3 - 4 :	26187	Volts	43.71		43.71		43.71	
	2 - 4 :	25564	Volts	42.63		42.63		42.63	
	2 - 5 :	24940	Volts	41.61		41.61		41.61	
	1 - 5 :	24317	Volts	40.54		40.54		40.54	
	1 - 6 :	23693	Volts	39.54		39.54		39.54	
RÉSISTANCE RESISTANCE		mesurées à / measured at :		22.5 °C					
SEC :	X1-X2	0.7162	mOhm	X1-X3	0.7201	mOhm	X2-X3	0.713	mOhm
PRI :	H1-H2	1453.2	mOhm	H1-H3	1455.2	mOhm	H2-H3	1454.6	mOhm
PERTES À VIDE ET COURANT D'EXCITATION NO LOAD LOSSES AND EXCITING CURRENT									
À 100% de la tension nominale : At 100% rated voltage :				5635	Watts	0.60	% Inom		
PERTES EN CHARGE LOAD LOSSES									
Avec la prise 100% au primaire : With the 100% tap on the primary :				16194	Watts mesurés à / measured at :	22.7	°C		
				22982	Watts calculés à / calculated at :	170	°C		
EFFICACITÉ SELON CSA C802.2-06 EFFICIENCY PER CSA C802.2-06									
99.19%				calculée à calculated at	0.50 75	p.u. °C			
Page 1 / 2									

Figure-A I-3 Essai de production pour le transformateur T4 première partie
Tirée de Général Électrique (2008, p.1)

ESSAI DE PRODUCTION / PRODUCTION TEST								
KVA :	2500	ANN	°C RISE :	150	DATE :	2008-02-15		
PRI :	24940	Y 125	kV BIL	PHASE :	3	W.O. # :	177274	
SEC :	600	Y 10	kV BIL	Hz :	60	PROJ :	ETS RÉSIDENCES ÉTUDIANTES	
Distinct Mod # :	CX3C2500 S007046		SER # :	XRA-0001-177274		REF :	GE Consumer & Industrial	
GENERAL MOD # :	E-CX3C2500 S007046-001							
IMPÉDANCE								
IMPEDANCE								
Mesurée à / measured at :	22.7	°C	IR :	0.65%	IX :	7.16%	IZ :	7.19%
Calculée à / calculated at :	170	°C	IR :	0.92%	IX :	7.16%	IZ :	7.22%
ESSAIS DIÉLECTRIQUES								
DIELECTRIC TESTS								
A) TENSION APPLIQUÉE / APPLIED HIGH VOLTAGE TEST :								
BT - (HT et noyau à la terre) / LV - (HV and core grounded) :	4000	Volts (60 Hz, 1 min test)						
HT - (BT et noyau à la terre) / HV - (LV and core grounded) :	40000	Volts (60 Hz, 1 min test)						
B) TENSION INDUITE / INDUCED HIGH VOLTAGE TEST :								
Les bornes du secondaire alimentées avec le double de la tension nominale								
Supplied secondary terminals with twice the rated voltage								
300	Hz, durant / during	24	sec.					
ISOLATION DU NOYAU								
CORE INSULATION								
10	GOhm	à / at	1000	Vdc				
Rédigé par / Written by :								
Approuvé par / Approved by :								
Page 2 / 2								

Figure-A I-4 Essai de production pour le transformateur T4 deuxième partie
Tirée de Général Électrique (2008, p.2)

ESSAI DE PRODUCTION / PRODUCTION TEST									
KVA :	2500	ANN			°C RISE :	150		DATE :	2010-08-10
PRI :	24940	Y	125	kV BIL	PHASE :	3		W.O. # :	189091
SEC :	600	Y	10	kV BIL	Hz :	60		PROJ :	Université McGill, CLUMEQ
Distinct Mod # :	CX3C2500 S009234				SER # :	XTF-0005-189091		REF :	GE Consumer & Industrial
GENERAL MOD # :	E-CX3C2500 S009234-001								
COUPLAGE PHASE RELATION		Yy0							
RAPPORT DE TENSION VOLTAGE RATIO		Prise Tap		H0-H1 X0-X1		H0-H2 X0-X2		H0-H3 X0-X3	
	3-4 :	26187	Volts	43.73		43.71		43.73	
	2-4 :	25564	Volts	42.66		42.64		42.64	
	2-5 :	24940	Volts	41.63		41.63		41.63	
	1-5 :	24317	Volts	40.55		40.55		40.55	
	1-8 :	23693	Volts	39.58		39.54		39.56	
RÉSISTANCE RESISTANCE		mesurées à / measured at :		24.4		°C			
SEC :	X1-X2	0.8028	mOhm	X1-X3	0.8231	mOhm	X2-X3	0.8196	mOhm
PRI :	H1-H2	1295	mOhm	H1-H3	1299	mOhm	H2-H3	1289	mOhm
PERTES À VIDE ET COURANT D'EXCITATION NO LOAD LOSSES AND EXCITING CURRENT									
À 100% de la tension nominale :				5847	Watts	0.44		% Inom	
At 100% rated voltage :									
PERTES EN CHARGE LOAD LOSSES									
Avec la prise 100% au primaire :				16547	Watts mesurés à / measured at :	24.7		°C	
With the 100% tap on the primary :				23109	Watts calculés à / calculated at :	170		°C	
EFFICACITÉ SELON CSA C802.2-06 EFFICIENCY PER CSA C802.2-06									
99.17%				calculée à calculated at		0.50 75		p.u. °C	
Page 1 / 2									

Figure-A I-5 Essai de production pour le transformateur T6 première partie
Tirée de Général Électrique (2010, p.1)

ESSAI DE PRODUCTION / PRODUCTION TEST								
KVA :	2500	ANN	°C RISE :	150	DATE :	2010-08-10		
PRI :	24940	Y	125 kV BIL	PHASE :	3	W.O. # :	189091	
SEC :	600	Y	10 kV BIL	Hz :	60	PROJ :	Université McGill, CLUMEQ	
Distinct Mod # :	CX3C2500 S009234			SER # :	XTF-0005-189091		REF :	GE Consumer & Industrial
GENERAL MOD # :	E-CX3C2500 S009234-001							
IMPÉDANCE								
IMPEDECANCE								
Mesurée à / measured at :	24.7	°C	IR :	0.66%	IX :	6.91%	IZ :	6.94%
Calculée à / calculated at :	170	°C	IR :	0.92%	IX :	6.91%	IZ :	6.97%
ESSAIS DIÉLECTRIQUES								
DIELECTRIC TESTS								
A) TENSION APPLIQUÉE / APPLIED HIGH VOLTAGE TEST :								
BT - (HT et noyau à la terre) / LV - (HV and core grounded) :	4000	Volts (60 Hz, 1 min test)						
HT - (BT et noyau à la terre) / HV - (LV and core grounded) :	40000	Volts (60 Hz, 1 min test)						
B) TENSION INDUITE / INDUCED HIGH VOLTAGE TEST :								
Les bornes du secondaire alimentées avec le double de la tension nominale								
Supplied secondary terminals with twice the rated voltage								
300	Hz, durant / during	24	sec.					
ISOLATION DU NOYAU								
CORE INSULATION								
0.4	GOhm	à / at	1000	Vdc				
Rédigé par / Written by	[REDACTED]							
Approuvé par / Approved by	[REDACTED]							
Page 2 / 2								

Figure-A I-6 Essai de production pour le transformateur T6 deuxième partie
Tirée de Général Électrique (2010, p.2)

ANNEXE II

AWG CROSS REFERENCE WIRE SINZING CHART

Tableau-A II-1 Table de conversion de AWG/MCM en mètre
Tiré de International Hydraulics Inc. (2007-2017)

Logical AWG Number	AWG (and "Aught" %/0 Equiv)	MCM or Circular kcmil	Circular MILS	Cross Section mm ²	Metric UL486 Equivalent mm ²	mm ² Lower	mm ² Higher	Cross Section in ²	Diameter SOLID inch	Diameter SOLID mm	Diameter Typ. Stranded inch	Diameter Typ. Stranded Approx. Max.
41	41		8	0.00397				0.0000062	0.0028	0.071		
40	40		10	0.00501				0.0000078	0.0031	0.08		
39	39		12	0.00632				0.0000098	0.0035	0.09		
38	38		16	0.00797				0.0000123	0.004	0.101		
37	37		20	0.01005				0.0000156	0.0045	0.113		
36	36		25	0.01267				0.0000196	0.005	0.127		
35	35		32	0.01597				0.0000248	0.0056	0.143		
34	34		40	0.02014				0.0000312	0.0063	0.16		
33	33		50	0.0254				0.0000394	0.0071	0.18		
32	32		63	0.03203				0.0000496	0.008	0.202		
31	31		80	0.04039				0.0000626	0.0089	0.227		
30	30		100	0.05093	0.05			0.0000789	0.01	0.255		
29	29		127	0.06422				0.0000995	0.0113	0.286		
28	28		160	0.08097	0.08			0.000126	0.0126	0.321		
27	27		201	0.10211				0.000158	0.0142	0.361		
26	26		254	0.12875	0.13			0.0002	0.0159	0.405		
25	25		320	0.16235				0.000252	0.0179	0.455		
24	24		404	0.20473	0.2			0.000317	0.0201	0.511		
23	23		509	0.25815				0.0004	0.0226	0.573		
22	22		642	0.32552	0.3			0.000505	0.0253	0.644		
21	21		810	0.41048				0.000636	0.0285	0.723		
20	20		1021	0.5176	0.5	0.5	0.75	0.000802	0.032	0.812	0.036	
19	19		1288	0.65268				0.00101	0.0359	0.912		
18	18		1624	0.82301	0.8	0.75	1.0	0.00128	0.0403	1.02	0.046	
17	17		2048	1.0378				0.00161	0.0453	1.15		
16	16		2582	1.30864	1.31	1.0	1.5	0.00203	0.0508	1.29	0.058	
15	15		3256	1.65016				0.00256	0.0571	1.45		
14	14		4106	2.0808	2.1	1.5	2.5	0.00323	0.0641	1.63	0.073	
13	13		5178	2.62384				0.00407	0.072	1.83		
12	12		6529	3.30859	3.3	2.5	4	0.00513	0.0808	2.05	0.092	
11	11		8233	4.17204				0.00647	0.0907	2.3		
10	10	10	10382	5.26084	5.3	4	6	0.00815	0.102	2.59	0.116	
9	9	13	13091	6.63377		6	10	0.0103	0.114	2.91	0.13	
8	8	17	16507	8.36501	8.4	6	10	0.013	0.128	3.26	0.146	
7	7	21	20815	10.5481		10	16	0.0163	0.144	3.66	0.164	
6	6	26	26248	13.3008	13.3	10	16	0.0206	0.162	4.12	0.184	
5	5	33	33098	16.772		16	25	0.026	0.182	4.62	0.206	
4	4	42	41735	21.149	21.2	16	25	0.0328	0.204	5.19	0.232	
3	3	53	52627	26.6684	26.7	25	35	0.0413	0.229	5.83	0.26	
2	2	66	66361	33.6281	33.6	25	35	0.0521	0.258	6.54	0.292	
1	1	84	83680	42.4042	42.4	35	50	0.0657	0.289	7.35	0.332	
0	1	/0	106	105518	53.4705	53.5	50	0.0829	0.325	8.25	0.373	
-1	2	/0	133	133056	67.4249	67.4	50	0.1045	0.365	9.27	0.419	
-2	3	/0	168	167780	85.021	85	70	0.1318	0.41	10.4	0.471	
-3	4	/0	212	211566	107.209	107	95	0.1662	0.46	11.68	0.528	
-3.7	4.7	/0	250	250000	126.677	120	120	0.1963	0.5	12.7	0.575	
-4.5	5.5	/0	300	300000	152.012	152	150	0.2356	0.548	13.91	0.63	
-5.2	6.2	/0	350	350000	177.348	177	150	0.2749	0.592	15.03	0.681	
-5.7	6.7	/0	400	400000	202.683	203	185	0.3142	0.632	16.06	0.728	
-6.3	7.3	/0	450	450000	228.018		185	0.3534	0.671	17.04		
-6.7	7.7	/0	500	500000	253.354	253	240	0.3927	0.707	17.96	0.814	
-7.5	8.5	/0	600	600000	304.025	304	300	0.4712	0.775	19.67	0.893	
-8.2	9.2	/0	700	700000	354.695	355	300	0.5498	0.837	21.25	0.964	
-8.5	9.5	/0	750	750000	380.031	380	300	0.589	0.866	22	0.999	
-8.7	9.7	/0	800	800000	405.366	405	400	0.6283	0.894	22.72	1.032	
-9.2	10.2	/0	900	900000	456.037	456	400	0.7069	0.949	24.1		
-9.7	10.7	/0	1000	1000000	506.708	508	500	0.7854	1	25.4	1.153	
-10.7	11.7	/0	1250	1250000	633.384	633	625	0.9817	1.118	28.4	1.289	
-11.4	12.4	/0	1500	1500000	760.061	760	625	1.1781	1.225	31.11	1.413	
-12.1	13.1	/0	1750	1750000	886.738	887	800	1.3744	1.323	33.6		
-12.7	13.7	/0	2000	2000000	1013.415	1010	1000	1.5708	1.414	35.92	1.632	

MCM means 1000's (M) of (C)ircular (M)ils. kcmil means 1000's (K) of (C)ircular (M)ils. Mil means 1/1000 inch. Circular Mil means the area of a circle 1/1000 inch in diameter. AWG = -4.3125 LN (mm²) + 17.16 (approx interpolated), AWG = -4.3125 LN (inch²) - 10.74 (approx interpolated). Logical AWG numbers are based on continuing the series in a logarithmic relationship to the cross sectional area of the wire.

ANNEXE III

SCRIPT DE MATLAB POUR LA SIMULATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU CAMPUS

Nous présentons ci-dessous le scripte ou code MATLAB que nous avons élaboré pour la simulation du campus universitaire de l'ÉTS :

```
close all  
clc
```

PAVILLON A TPP1R A-0350

```
[num1R,txt1R,row1R]=xlsread('TPP1R.xlsx');  
P1R=zeros(352,1);  
Q1R=zeros(352,1);  
S1R=zeros(352,1);  
for i=2:1:355  
P1R(i-1,1)=str2double(row1R{i,2});  
Q1R(i-1,1)=str2double(row1R{i,3});  
S1R(i-1,1)=str2double(row1R{i,4});  
End
```

TBR A-0450

```
[numBR,txtBR,rowBR]=xlsread('TBR.xlsx');  
PBR=zeros(893,1);  
QBR=zeros(893,1);  
SBR=zeros(893,1);
```

```
for i=2:1:896
PBR(i-1,1)=str2double(rawBR{i,2});
QBR(i-1,1)=str2double(rawBR{i,3});
SBR(i-1,1)=str2double(rawBR{i,4});
end
```

RC-TR-01 A-0692

```
[num1A,txt1A,row1A]=xlsread('RCTR01P1.xlsx');
[num3A,txt3A,row3A]=xlsread('RCTR01P3.xlsx');
```

```
P1A=zeros(913,1);
Q1A=zeros(913,1);
S1A=zeros(913,1);
```

```
P3A=zeros(1143,1);
Q3A=zeros(1143,1);
S3A=zeros(1143,1);
```

```
for i=2:1:916
P1A(i-1,1)=str2double(row1A{i,2});
Q1A(i-1,1)=str2double(row1A{i,3});
S1A(i-1,1)=str2double(row1A{i,4});
end
```

```
for i=2:1:1146
P3A(i-1,1)=str2double(row3A{i,2});
Q3A(i-1,1)=str2double(row3A{i,3});
S3A(i-1,1)=str2double(row3A{i,4});
```

end

RC-TR-02 A-0692

```
[numP4,txtP4,rawP4]=xlsread('RCTR02.xlsx');
```

```
PP4=zeros(601,1);
```

```
QP4=zeros(601,1);
```

```
SP4=zeros(601,1);
```

```
for i=2:1:604
```

```
PP4(i-1,1)=str2double(rawP4{i,2});
```

```
QP4(i-1,1)=str2double(rawP4{i,3});
```

```
SP4(i-1,1)=str2double(rawP4{i,4});
```

```
end
```

TPPHR A-0840

```
[numHR,txtHR,rawHR]=xlsread('TPPHR.xlsx');
```

```
PHR=zeros(605,1);
```

```
QHR=zeros(605,1);
```

```
SHR=zeros(605,1);
```

```
for i=2:1:608
```

```
PHR(i-1,1)=str2double(rawHR{i,2});
```

```
QHR(i-1,1)=str2double(rawHR{i,3});
```

```
SHR(i-1,1)=str2double(rawHR{i,4});
```

```
end
```

TPPA1 A-1362

```
[numA1,txtA1,rawA1]=xlsread('2TPPA1.xlsx');
```

```
PA1=zeros(390,1);
```

```
QA1=zeros(390,1);
```

```
SA1=zeros(390,1);
```

```
for i=2:1:393
```

```
PA1(i-1,1)=str2double(rawA1 {i,2})*2;
```

```
QA1(i-1,1)=str2double(rawA1 {i,3})*2;
```

```
SA1(i-1,1)=str2double(rawA1 {i,4})*2;
```

```
end
```

TB1 A-1508.1

```
[numB1,txtB1,rawB1]=xlsread('A1508.1.xlsx');
```

```
PB1=zeros(220,1);
```

```
QB1=zeros(220,1);
```

```
SB1=zeros(220,1);
```

```
for i=2:1:223
```

```
PB1(i-1,1)=str2double(rawB1 {i,2})*3;
```

```
QB1(i-1,1)=str2double(rawB1 {i,6})*3;
```

```
SB1(i-1,1)=str2double(rawB1 {i,10})*3;
```

```
end
```

T-1531 01-TR-02 A-1531

```
[num305,txt305,raw305]=xlsread('2A1531.xlsx');
```

```
[num306,txt306,raw306]=xlsread('P306T1531mulpar2.xlsx');
```

```

P305=zeros(1179,1);
Q305=zeros(1179,1);
S305=zeros(1179,1);
for i=2:1:1182
P305(i-1,1)=str2double(raw305{i,2})*2;
Q305(i-1,1)=str2double(raw305{i,3})*2;
S305(i-1,1)=str2double(raw305{i,4})*2;
end

```

```

P306=zeros(47,1);
Q306=zeros(47,1);
S306=zeros(47,1);

```

```

for i=2:1:50
P306(i-1,1)=str2double(raw306{i,2})*2;
Q306(i-1,1)=str2double(raw306{i,3})*2;
S306(i-1,1)=str2double(raw306{i,4})*2;
end

```

TPPC1 A-1850

```

[numC1,txC1,rowC1]=xlsread('TPPC1.xlsx');
PC1=zeros(616,1);
QC1=zeros(616,1);
SC1=zeros(616,1);

```

```

for i=2:1:619
PC1(i-1,1)=str2double(rowC1{i,2});
QC1(i-1,1)=str2double(rowC1{i,3});

```

```
SC1(i-1,1)=str2double(rawC1{i,4});
```

```
End
```

T1-A-2536.1 & T2-A-2536.1

```
[num1ups,txt1ups,raw1ups]=xlsread('T1A2536-1.xlsx');
```

```
[num2ups,txt2ups,raw2ups]=xlsread('T2A2536-1.xlsx');
```

```
P1ups3=zeros(593,1);
```

```
Q1ups3=zeros(593,1);
```

```
S1ups3=zeros(593,1);
```

```
for i=2:1:596
```

```
P1ups3(i-1,1)=str2double(raw1ups{i,2});
```

```
Q1ups3(i-1,1)=str2double(raw1ups{i,3});
```

```
S1ups3(i-1,1)=str2double(raw1ups{i,4});
```

```
end
```

```
P2ups3=zeros(1772,1);
```

```
Q2ups3=zeros(1772,1);
```

```
S2ups3=zeros(1772,1);
```

```
for i=2:1:1775
```

```
P2ups3(i-1,1)=str2double(raw2ups{i,2});
```

```
Q2ups3(i-1,1)=str2double(raw2ups{i,3});
```

```
S2ups3(i-1,1)=str2double(raw2ups{i,4});
```

```
end
```

TPPD2 A-2840

```
[numD2,txtD2,rawD2]=xlsread('TPPD2.xlsx');  
PD2=zeros(611,1);  
QD2=zeros(611,1);  
SD2=zeros(611,1);  
  
for i=2:1:614  
PD2(i-1,1)=str2double(rawD2{i,2});  
QD2(i-1,1)=str2double(rawD2{i,3});  
SD2(i-1,1)=str2double(rawD2{i,4});  
end
```

T2-A-3502 A-3502

```
[numups4,txtups4,rawups4]=xlsread('A3502T2.xlsx');  
  
Pups4=zeros(2041,1);  
Qups4=zeros(2041,1);  
Sups4=zeros(2041,1);  
  
for i=2:1:2044  
Pups4(i-1,1)=str2double(rawups4{i,2});  
Qups4(i-1,1)=str2double(rawups4{i,3});  
Sups4(i-1,1)=str2double(rawups4{i,4});  
end
```

03-TR-01 A-3540

```
[num303,txt303,row303]=xlsread('03-TR-01.xlsx');
[num304,txt304,row304]=xlsread('mulpar2P(304) A4500 04-D2-01.xlsx');
P303=zeros(2663,1);
Q303=zeros(2663,1);
S303=zeros(2663,1);

for i=2:1:2666
P303(i-1,1)=str2double(raw303{i,2});
Q303(i-1,1)=str2double(raw303{i,6});
S303(i-1,1)=str2double(raw303{i,11});
end

P304=zeros(211,1);
Q304=zeros(211,1);
S304=zeros(211,1);

for i=2:1:214
P304(i-1,1)=str2double(raw304{i,2})*2;
Q304(i-1,1)=str2double(raw304{i,3})*2;
S304(i-1,1)=str2double(raw304{i,4})*2;
end
```

03-TR-02 A-3548

```
[num307,txt307,row307]=xlsread('03-TR-02comp.xlsx');
[num308,txt308,row308]=xlsread('mulpar2P(308) 04-D2-02 A4508.xlsx');
P307=zeros(306,1);
```

```

Q307=zeros(306,1);
S307=zeros(306,1);

for i=2:1:309
P307(i-1,1)=str2double(raw307{i,2});
Q307(i-1,1)=str2double(raw307{i,3});
S307(i-1,1)=str2double(raw307{i,4});
end

```

```

P308=zeros(1726,1);
Q308=zeros(1726,1);
S308=zeros(1726,1);
for i=2:1:1729
P308(i-1,1)=str2double(raw308{i,2})*2;
Q308(i-1,1)=str2double(raw308{i,3})*2;
S308(i-1,1)=str2double(raw308{i,4})*2;
end

```

T2-A-3548 A-3548

```

[num35,txt35,row35]=xlsread('P35A3548T2.xlsx');
[num36,txt36,row36]=xlsread('T2A3548P36.xlsx');
P35=zeros(812,1);
Q35=zeros(812,1);
S35=zeros(812,1);

for i=2:1:815
P35(i-1,1)=str2double(raw35{i,2});
Q35(i-1,1)=str2double(raw35{i,3});

```

```
S35(i-1,1)=str2double(raw35{i,4});  
end
```

```
P36=zeros(2304,1);  
Q36=zeros(2304,1);  
S36=zeros(2304,1);
```

```
for i=2:1:2307  
P36(i-1,1)=str2double(raw36{i,2});  
Q36(i-1,1)=str2double(raw36{i,3});  
S36(i-1,1)=str2double(raw36{i,4});  
End
```

TPPC3 A-3853

```
[numC3,txtC3,rowC3]=xlsread('TPPC3.xlsx');  
PC3=zeros(1209,1);  
QC3=zeros(1209,1);  
SC3=zeros(1209,1);  
for i=2:1:1211  
PC3(i-1,1)=str2double(rawC3{i,2});  
QC3(i-1,1)=str2double(rawC3{i,3});  
SC3(i-1,1)=str2double(rawC3{i,4});  
End
```

TPPA3 A-3886

```
[numA3,txtA3,rowA3]=xlsread('TPPA3.xlsx');  
PA3=zeros(1206,1);
```

```

QA3=zeros(1206,1);
SA3=zeros(1206,1);

for i=2:1:1209
PA3(i-1,1)=str2double(rawA3{i,2});
QA3(i-1,1)=str2double(rawA3{i,3});
SA3(i-1,1)=str2double(rawA3{i,4});
end

```

CLUMEQ A-4530

```

[numCLQ8,txtCLQ8,rawCLQ8]=xlsread('TRANSFO 04-08.xlsx');
[numCLQ7,txtT7,rawCLQ7]=xlsread('TRANSFO 04-07.xlsx');
[numCLQ5,txtR5,rawCLQ5]=xlsread('TRANSFO 04-05.xlsx');
[numCLQ4,txtCLQ4,rawCLQ4]=xlsread('TRANSFO 04-04.xlsx');
[numCLQ3,txtCLQ3,rawCLQ3]=xlsread('TRANSFO 04-03.xlsx');
PCLQ8=zeros(1486,1);
QCLQ8=zeros(1486,1);
SCLQ8=zeros(1486,1);

for i=2:1:1489
PCLQ8(i-1,1)=str2double(rawCLQ8{i,2});
QCLQ8(i-1,1)=str2double(rawCLQ8{i,3});
SCLQ8(i-1,1)=str2double(rawCLQ8{i,4});
end

PCLQ7=zeros(1484,1);
QCLQ7=zeros(1484,1);
SCLQ7=zeros(1484,1);

```

```
for i=2:1:1487
PCLQ7(i-1,1)=str2double(rawCLQ7{i,2});
QCLQ7(i-1,1)=str2double(rawCLQ7{i,6});
SCLQ7(i-1,1)=str2double(rawCLQ7{i,10});
end
PCLQ5=zeros(609,1);
QCLQ5=zeros(609,1);
SCLQ5=zeros(609,1);
```

```
for i=2:1:612
PCLQ5(i-1,1)=str2double(rawCLQ5{i,2});
QCLQ5(i-1,1)=str2double(rawCLQ5{i,3});
SCLQ5(i-1,1)=str2double(rawCLQ5{i,4});
end
```

```
PCLQ4=zeros(604,1);
QCLQ4=zeros(604,1);
SCLQ4=zeros(604,1);
```

```
for i=2:1:607
PCLQ4(i-1,1)=str2double(rawCLQ4{i,2});
QCLQ4(i-1,1)=str2double(rawCLQ4{i,6});
SCLQ4(i-1,1)=str2double(rawCLQ4{i,10});
end
```

```
PCLQ3=zeros(2294,1);
QCLQ3=zeros(2294,1);
SCLQ3=zeros(2294,1);
```

```

for i=2:1:2297
PCLQ3(i-1,1)=str2double(rawCLQ3{i,2});
QCLQ3(i-1,1)=str2double(rawCLQ3{i,6});
SCLQ3(i-1,1)=str2double(rawCLQ3{i,10});
End

```

PAVILLON B
RC-TR-01 B-0102

```
[num10B,txt10B,raw10B]=xlsread('B0102RCD201.xlsx');
```

```

P10B=zeros(1229,1);
Q10B=zeros(1229,1);
S10B=zeros(1229,1);

```

```

for i=2:1:1232
P10B(i-1,1)=str2double(raw10B{i,2});
Q10B(i-1,1)=str2double(raw10B{i,3});
S10B(i-1,1)=str2double(raw10B{i,4});
end

```

01-TR-01 B-1102

```

[num12B,txt12B,raw12B]=xlsread('B1103P12.xlsx');
P12B=zeros(43,1);
Q12B=zeros(43,1);
S12B=zeros(43,1);

```

```
for i=2:1:46
P12B(i-1,1)=str2double(raw12B{i,2});
Q12B(i-1,1)=str2double(raw12B{i,6});
S12B(i-1,1)=str2double(raw12B{i,10});
end
```

```
[num13B,txt13B,raw13B]=xlsread('B1103P13.xlsx');
P13B=zeros(245,1);
Q13B=zeros(245,1);
S13B=zeros(245,1);
```

```
for i=2:1:248
P13B(i-1,1)=str2double(raw13B{i,2});
Q13B(i-1,1)=str2double(raw13B{i,6});
S13B(i-1,1)=str2double(raw13B{i,10});
end
```

```
[num14B,txt14B,raw14B]=xlsread('B1103P14.xlsx');
P14B=zeros(863,1);
Q14B=zeros(863,1);
S14B=zeros(863,1);
```

```
for i=2:1:866
P14B(i-1,1)=str2double(raw14B{i,2});
Q14B(i-1,1)=str2double(raw14B{i,6});
S14B(i-1,1)=str2double(raw14B{i,10});
end
```

```
[numAG03,txtAG03,rawAG03]=xlsread('MULPAR202ag03.xlsx');
```

```
PAG03=zeros(283,1);
QAG03=zeros(283,1);
SAG03=zeros(283,1);

for i=2:1:286
PAG03(i-1,1)=str2double(rawAG03 {i,2})*2;
QAG03(i-1,1)=str2double(rawAG03 {i,3})*2;
SAG03(i-1,1)=str2double(rawAG03 {i,4})*2;
end
```

02-TR-01 B-2102

```
[numTRYB,txtTRY,rawTRY]=xlsread('TRY.xlsx');

PTRY=zeros(894,1);
QTRY=zeros(894,1);
STRY=zeros(894,1);

for i=2:1:897
PTRY(i-1,1)=str2double(rawTRY {i,2});
QTRY(i-1,1)=str2double(rawTRY {i,3});
STRY(i-1,1)=str2double(rawTRY {i,4});
end

[num22B,txt22B,raw22B]=xlsread('B2102P22.xlsx');
P22B=zeros(239,1);
Q22B=zeros(239,1);
S22B=zeros(239,1);
```

```
for i=2:1:242
P22B(i-1,1)=str2double(raw22B{i,2});
Q22B(i-1,1)=str2double(raw22B{i,3});
S22B(i-1,1)=str2double(raw22B{i,4});
end

[num26B,txt26B,raw26B]=xlsread('B2102P26.xlsx');
P26B=zeros(541,1);
Q26B=zeros(541,1);
S26B=zeros(541,1);

for i=2:1:544
P26B(i-1,1)=str2double(raw26B{i,2});
Q26B(i-1,1)=str2double(raw26B{i,3});
S26B(i-1,1)=str2double(raw26B{i,4});
end

[num2AG03,txt2AG03,raw2AG03]=xlsread('BG03MULPAR2.xlsx');

P2AG03=zeros(297,1);
Q2AG03=zeros(297,1);
S2AG03=zeros(297,1);

for i=2:1:300
P2AG03(i-1,1)=str2double(raw2AG03{i,2})*2;
Q2AG03(i-1,1)=str2double(raw2AG03{i,3})*2;
S2AG03(i-1,1)=str2double(raw2AG03{i,4})*2;
end
```

03-TR-01 B-3102

```
[num31B,txt31B,row31B]=xlsread('B3102P31.xlsx');
```

```
P31B=zeros(232,1);
```

```
Q31B=zeros(232,1);
```

```
S31B=zeros(232,1);
```

```
for i=2:1:235
```

```
P31B(i-1,1)=str2double(row31B{i,2});
```

```
Q31B(i-1,1)=str2double(row31B{i,3});
```

```
S31B(i-1,1)=str2double(row31B{i,4});
```

```
end
```

```
[num32B,txt32B,row32B]=xlsread('B3102P32.xlsx');
```

```
P32B=zeros(27,1);
```

```
Q32B=zeros(27,1);
```

```
S32B=zeros(27,1);
```

```
for i=2:1:30
```

```
P32B(i-1,1)=str2double(row32B{i,2});
```

```
Q32B(i-1,1)=str2double(row32B{i,3});
```

```
S32B(i-1,1)=str2double(row32B{i,4});
```

```
end
```

```
[num33B,txt33B,row33B]=xlsread('B3102P33.xlsx');
```

```
P33B=zeros(42,1);
```

```
Q33B=zeros(42,1);
```

```
S33B=zeros(42,1);
```

```

for i=2:1:45
P33B(i-1,1)=str2double(raw33B{i,2});
Q33B(i-1,1)=str2double(raw33B{i,3});
S33B(i-1,1)=str2double(raw33B{i,4});
end

```

PAVILLON E MDE
TR-SS2-2 E.S2-013

```

[num,txt,row]=xlsread('TRSS22.xlsx');
PSS2=zeros(3220,1);
QSS2=zeros(3220,1);
SSS2=zeros(3220,1);
for i=2:1:3223
PSS2(i-1,1)=str2double(raw{i,2});
QSS2(i-1,1)=str2double(raw{i,3});
SSS2(i-1,1)=str2double(raw{i,4});
end

```

T-CHILLER-2 E.S2-013

```

[numchil,txtchil,rowchil]=xlsread('chiller802.xlsx');
Pchil802=zeros(1162,1);
Qchil802=zeros(1162,1);
Schil802=zeros(1162,1);

for i=2:1:1165
Pchil802(i-1,1)=str2double(rawchil{i,2});
Qchil802(i-1,1)=str2double(rawchil{i,3});

```

```
Schil802(i-1,1)=str2double(rawchil{i,4});
end
```

TR-A-1 E.6-001

```
[num6001,txt6001,raw6001]=xlsread('TRA1MULPAR2.xlsx');
P6001=zeros(976,1);
Q6001=zeros(976,1);
S6001=zeros(976,1);
```

```
for i=2:1:979
P6001(i-1,1)=str2double(raw6001{i,2})*2;
Q6001(i-1,1)=str2double(raw6001{i,3})*2;
S6001(i-1,1)=str2double(raw6001{i,4})*2;
end
```

METRO

MA-TR-0101 SS1-METRO

```
[num1,txt1,raw1]=xlsread('MATR0101.xlsx');
P1=zeros(87,1);
Q1=zeros(87,1);
S1=zeros(87,1);
```

```
for i=2:1:90
P1(i-1,1)=str2double(raw1{i,2})*4;
Q1(i-1,1)=str2double(raw1{i,3})*4;
S1(i-1,1)=str2double(raw1{i,4})*4;
end
```

MA-TR-0102 SS1-METRO

```
[num2,txt2,row2]=xlsread('MATR0102.xlsx');  
P2=zeros(483,1);  
Q2=zeros(483,1);  
S2=zeros(483,1);  
for i=2:1:486  
P2(i-1,1)=str2double(row2{i,2})*3;  
Q2(i-1,1)=str2double(row2{i,3})*3;  
S2(i-1,1)=str2double(row2{i,4})*3;  
end
```

RÉSIDENCE PH4**TL-8A R4-904**

```
[num8A,txt8A,row8A]=xlsread('904 MUL PAR 2.xlsx');  
P8A=zeros(194,1);  
Q8A=zeros(194,1);  
S8A=zeros(194,1);  
  
for i=2:1:197  
P8A(i-1,1)=str2double(row8A{i,2})*2;  
Q8A(i-1,1)=str2double(row8A{i,3})*2;  
S8A(i-1,1)=str2double(row8A{i,4})*2;  
end
```

TL-8B R4-913

```
[num8B,txt8B,row8B]=xlsread('913.xlsx');
```

```

P8B=zeros(380,1);
Q8B=zeros(380,1);
S8B=zeros(380,1);

for i=2:1:383
P8B(i-1,1)=str2double(raw8B{i,2});
Q8B(i-1,1)=str2double(raw8B{i,3});
S8B(i-1,1)=str2double(raw8B{i,4});
end

```

TL-RA R4-105

```

[numRA,txtRA,rawRA]=xlsread('105 mulpar2.xlsx');
PRA=zeros(544,1);
QRA=zeros(544,1);
SRA=zeros(544,1);

for i=2:1:547
PRA(i-1,1)=str2double(rawRA{i,2})*2;
QRA(i-1,1)=str2double(rawRA{i,3})*2;
SRA(i-1,1)=str2double(rawRA{i,4})*2;
end

```

TL-RA R4-105

```

[numRB,txtRB,rawRB]=xlsread('123mulpar2.xlsx');
PRB=zeros(1080,1);
QRB=zeros(1080,1);
SRB=zeros(1080,1);

```

```
for i=2:1:1083
PRB(i-1,1)=str2double(rawRB{i,2})*2;
QRB(i-1,1)=str2double(rawRB{i,3})*2;
SRB(i-1,1)=str2double(rawRB{i,4})*2;
end
```

INGO

04-TR-401 INGO-409

```
[num4,txt4,row4]=xlsread('04TR401.xlsx');
P4=zeros(391,1);
Q4=zeros(391,1);
S4=zeros(391,1);
```

```
for i=2:1:394
P4(i-1,1)=str2double(row4{i,2});
Q4(i-1,1)=str2double(row4{i,3});
S4(i-1,1)=str2double(row4{i,4});
end
```

07-TR-401 INGO-708

```
[num7,txt7,row7]=xlsread('07TR401.xlsx');
P7=zeros(1190,1);
Q7=zeros(1190,1);
S7=zeros(1190,1);
```

```
for i=2:1:1193
```

```

P7(i-1,1)=str2double(raw7{i,2});
Q7(i-1,1)=str2double(raw7{i,3});
S7(i-1,1)=str2double(raw7{i,4});
end

```

RÉSIDENCE PH1 TA-BUANDERIE R1-00084

```

[numPH1,txtPH1,rawPH1]=xlsread('R1-084 P2.xlsx');
PRPH1=zeros(925,1);
QRPH1=zeros(925,1);
SRPH1=zeros(925,1);

for i=2:1:928
PRPH1(i-1,1)=str2double(rawPH1{i,2});
QRPH1(i-1,1)=str2double(rawPH1{i,3});
SRPH1(i-1,1)=str2double(rawPH1{i,4});
end

```

Simulation de Station de recharge pour les véhicules électriques

```

[numV,txtV,rawV]=xlsread('VOITUERE ELECTRIQUE.xlsx');

PV=zeros(50,1);
QV=zeros(50,1);
SV=zeros(50,1);

for i=2:1:53
PV(i-1,1)=str2double(rawV{i,2});

```

```

QV(i-1,1)=str2double(rawV{i,3});
SV(i-1,1)=sqrt((PV(i-1,1)^2)+(QV(i-1,1)^2));
end
for i=1:1:length(STOT)
v(i,1)=i*5;
v(i,2)=STOT(:,i);
v(i,3)=SMDE(:,i);
end
hold on
figure()
subplot(1,2,2)
plot(v(:,1),v(:,2),'-',v(:,1),v(:,3),'-')
grid on
legend('TPP1R Pavillon A', 'TR-SS2-2 Pavillon E')
xlabel('Temps (min)')
ylabel('Puissance apparente S(kVA)')
subplot(1,2,1)
plot(Temps/60,PTOT,'-',Temps/60,PMDE,'-')
grid on
legend('TPP1R Pavillon A', 'TR-SS2-2 Pavillon E')
xlabel('Temps (min)')
ylabel('Puissance P(KW)')
hold off
hold on
figure()
subplot(1,2,2)
plot(Temps(1:length(PV))/60,PV)
grid on
xlabel('Temps (min)')

```

```
ylabel('Puissance P(KW)')
subplot(1,2,1)
plot(Temps(1:length(SV))/60,SV)
grid on
xlabel('Temps (min)')
ylabel('Puissance apparente(kVA)')
hold off
```


BIBLIOGRAPHIE

- APQ. 2015. The Effective Value of Source Impedance. APQ. Menomonee Falls, Waukesha County, Wisconsin, Tech. Rep. TN-GENL-1-APQ.
- A. S. Masoum, S. Deilami, P. S. Moses, M. A. S. Masoum et A. Abu Saida. Août. 2011. Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation. IET Gener., Transmiss. Distrib., vol. 5, no. 8, pp. 877-888.
- A. Y. Saber, et G. K. Venayagamoorthy. Avril 2011. Plug-in vehicle and renewable energy sources for cost and emission reductions. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 4, pp. 1229-1238.
- Brian C. Wadell. 1991. Transmission Line Design Handbook. Norwood, MA: Artech House Book.
- B. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, Anuradha, et D. P. Kothari. 1998. Reactive power compensation and load balancing in electric power distribution systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 20, no. 6, pp. 375-381.
- D. Therriault. Août. 2010. Essai de production. Général Électrique. Montréal, Canada, Tech. Rep. 177274.
- Hydro-Québec. Décembre 2012. « Limites d'émission de perturbations dans le réseau de transport d'Hydro-Québec ». En ligne.
<http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/208/DocPrj/R-3830-2012-B-0008-DEMANDE-PIECE-2012_12_20.pdf>.
- Hydro-Québec. Décembre 2016. « Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension d'Hydro-Québec ». En ligne.
<<http://www.hydroquebec.com/data/transenergie/pdf/qualite-onde-tension-transport.pdf>>.
- Hydro-Québec. Décembre 2016. « Caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension d'Hydro-Québec ». En ligne.
<http://www.hydroquebec.com/transenergie/fr/commerce/pdf/qualite_onda_tension_dist.pdf>.
- Hydro-Québec. 2014. Le déséquilibre de tension et de courant. Hydro-Québec. Montréal, Québec. Tech. Rep. 2014G1546.

- H. Sakkou. 2007. Conception d'un compensateur actif multifonctions corrigeant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc. M.S. thesis, Dept., Génie. Électrique., École de Technologie Supérieure., Montréal., Québec.
- International Hydraulics Inc. (2007-2017). « AWG Cross Reference Wire Sizing Chart ». En ligne. < <http://www.ihiconnectors.com/AWG%20wire%20sizes.htm> >.
- Jacques Schonek. 2000. Les singularités de l'harmonique 3. Schneider Electric. Tech. Rep. Cahier technique n° 202.
- M. Lessard. Septembre 2004. Essai de production. Général Électrique. Montréal, Canada, Tech. Rep. 158520.
- N. H. MENDALEK. 2003. Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation. Ph.D. dissertation, Dept., Génie. Électrique., École de Technologie Supérieure., Montréal., Québec.
- P. Miltra, G. K. Venayagamoorthy, et K. A. Corzine. Septembre 2011. Smartpark as a virtual STATCOM, IEEE Trans. Smart Grid, vol 2, no. 3, pp. 445-455.
- Paul-André Plante. Février 2008. Essai de production. Général Électrique. Montréal, Canada, Tech. Rep. 189091.
- Philippe Ferrapacci. 2001. La qualité de l'énergie électrique. Schneider Electric. Tech. Rep. Cahier technique n° 199.
- R. Van der Put. Juillet 2017. « 33 kWh BMW i3 VS 30 kWh Nissan LEAF fast charging comparison ». En ligne. < <http://insideevs.com/33-kwh-bmw-i3-and-30-kwh-nissan-leaf-fast-charging-comparison/> >.
- S. Bisanovic, M. Hajro et M. Samardzic. 2014. One approach for reactive power control of capacitor banks in distribution and industrial networks. Electrical Power systems, vol. 60, pp. 67-73.
- S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, M. A. S. Masoum et A. Abu Saida. Septembre 2011. Real-time coordination of plug-in electric vehicles charging in smart grids to minimise power losses and improve voltage profile. IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 3, pp. 456-467.
- S. G. Wirasingha, N. Schofield, et A. Emadi. Septembre 2008. Plug-in hybrid electric vehicle developments in the US: Trends, barriers, and economic feasibility. in Proc. IEEE VPPC, pp. 1-8.

- Tan Ma et Osama. A. Mohammed. Juillet/Août. 2014. Optimal Charging of Plug-in Electric Vehicles for a Car-Park Infrastructure. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 4.
- Y. S. Shiao, C. E. Lin, M. T. Tsai, et C. L. Huang. Avril 1992. Harmonic and reactive current compensation using a voltage source inverter in a battery energy storage system. Electrical Power systems research, vol. 25, pp. 25-33.

