

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
MARC-ANTOINE DURAND

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'ANALYSE DE LA QUALITÉ DE L'ONDE
DANS UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE INTELLIGENT

FÉVRIER 2018

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

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

Programme offert par l'Université du Québec à Trois-Rivières

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'ANALYSE DE LA QUALITÉ DE L'ONDE
DANS UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE INTELLIGENT

PAR

MARC-ANTOINE DURAND

Mamadou Lamine Doumbia, directeur de recherche Université du Québec à Trois-Rivières

Francisc Zavoda, codirecteur de recherche Institut de recherche d'Hydro-Québec

François Nougrou, évaluateur Université du Québec à Trois-Rivières

Ahmed Chériti, évaluateur Université du Québec à Trois-Rivières

Résumé

Le document qui suit amène des solutions potentielles à la problématique suivante : permettre l'automatisation d'un processus de classification de perturbations qui ont été au préalable recueillies sur un réseau électrique intelligent, par l'entremise d'appareils de mesures dédiés. Cette problématique est proposée dans le but d'obtenir, avec une intervention humaine la plus minime possible, des conclusions viables quant à la nature des perturbations relevées à différents endroits du réseau électrique. Ultimement, une classification rigoureuse des déformations de l'onde est effectuée et des diagnostics clairs sont exposés à l'utilisateur. De cette manière, un entretien préventif des équipements électriques par les autorités compétentes peut être planifié, augmentant leur efficacité à long terme et diminuant par le fait même les coûts de remplacement dus à un vieillissement prématuré des composantes.

Afin de répondre à la problématique, un logiciel de traitement de la qualité de l'onde est développé et des fonctionnalités y sont greffées. Ces fonctionnalités comprennent : la connexion à des bases de données contenant des perturbations, l'importation et l'analyse de ces dernières, ainsi que la génération de rapports regroupant toutes les informations pertinentes extraites lors de l'analyse.

Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Liste des symboles.....	xiv
Lexique	xv
Introduction	1
Chapitre 1 - Outils de mesures et perturbations étudiées.....	4
1.1. Qualité de l'onde	4
1.2. Outils de mesure.....	8
1.3. Perturbations transitoires	10
1.3.1. Transitoires impulsives	11
1.3.2. Transitoires oscillatoires.....	14
Chapitre 2 - Méthodologie	17
2.1. Introduction.....	17
2.2. Segmentation.....	17
2.2.1. Processus général	19

2.2.2. Potentielles limitations	21
2.3. Détection et extraction des signaux transitoires.....	24
2.3.1. Amplitude crête ou maximale	28
2.3.2. Phase initiale	35
2.3.3. Fréquence fondamentale	39
2.3.4. Création des cycles synthétiques	40
2.3.5. Isolation des perturbations	41
2.3.6. Détection des cycles perturbés	43
2.4 Extraction des informations pertinentes	46
2.4.1. Paramètres fréquentiels.....	47
2.4.1.1. Durée et amplitude maximale.....	50
2.4.1.2. Nombre d'harmoniques P.....	52
2.4.1.3. Application d'ESPRIT	57
2.4.2. Caractéristiques globales.....	63
2.4.2.1. Type de transitoire	63

2.4.2.2. Variation de la puissance apparente, active et réactive ainsi que du facteur de puissance	65
2.4.2.3. Cause et origine possible de la transitoire	68
2.5. Conclusion partielle.....	74
Chapitre 3 - Intégration logicielle.....	75
3.1. But général de l'application.....	75
3.2. Interface utilisateur.....	76
3.3. Rapport généré	84
3.3.1. Rapport HTML/Rapport sur onglets.....	86
3.3.2. Rapport LaTeX.....	88
3.3.3. Contenu des rapports	89
3.4. Conclusion partielle.....	97
Chapitre 4 - Résultats.....	99
4.1. Tests sur des données synthétiques	99
4.2. Tests sur des données réelles	108
4.3. Conclusion partielle.....	119

Chapitre 5 - Travaux futurs et conclusion.....	122
Bibliographie	125
Annexe A- Power System Transients Analysis Based On Rotational Invariance Technique	128

Liste des tableaux

Tableau 1-1 - Classification des transitoires oscillatoires	14
Tableau 2-1 - Valeurs crêtes non triées	32
Tableau 2-2 - Valeurs crêtes absolues triées.....	32
Tableau 2-3 - Vecteurs de changements de signes.....	36
Tableau 2-4 - Priorisation des conditions pour la mise sous tension d'une banque de condensateurs	72
Tableau 2-5 - Priorisation des conditions pour la mise hors tension d'une banque de condensateurs	72
Tableau 4-1 - Valeurs de l'onde synthétique.....	101
Tableau 4-2 - Causes associées aux perturbations détectées	117
Tableau 4-3 - Origines associées aux perturbations.....	117

Liste des figures

Figure 1-1 - Conditions d'exploitation canadienne	5
Figure 1-2 - Récapitulatif des perturbations et de leurs effets	7
Figure 1-3 - Appareil de mesure (compteur) modèle ION 8650 de Schneider.....	8
Figure 1-4 - Allure du courant lors d'une transitoire causée par la foudre	12
Figure 1-5 - Transitoire de type impulsive	13
Figure 1-6 - Transitoire de type oscillatoire	16
Figure 2-1 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre - Sinusoïdales.....	23
Figure 2-2 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre – RMS.....	23
Figure 2-3 - Organigramme d'isolation de transitoires.....	27
Figure 2-4 - Analyse des amplitudes crêtes	31
Figure 2-5 - Analyse des passages par zéro	36
Figure 2-6 - Onde résultante	42
Figure 2-7 - Organigramme d'application d'ESPRIT	48
Figure 2-8 - Indices de transitoire	51

Figure 2-9 - Valeurs propres standardisées.....	54
Figure 2-10 - Fenêtre mobile d'ESPRIT	62
Figure 2-11 - Puissances en jeu.....	66
Figure 3-1 - Barre d'outils.....	77
Figure 3-2 - Propriétés de l'algorithme de détection de creux	80
Figure 3-3 - Propriétés de l'algorithme de détection de transitoires.....	81
Figure 3-4 - Configuration globale de l'interface.....	82
Figure 3-5 - Sélection de la source de données.....	82
Figure 3-6 - Configuration de l'emplacement de l'appareil de mesure.....	83
Figure 3-7 - Configuration des types de rapports.....	84
Figure 3-8 - Configuration du contenu des rapports	85
Figure 3-9 - Allure d'un rapport sur onglets	87
Figure 3-10 - Allure d'un rapport HTML	88
Figure 3-11 - Allure d'un rapport LaTeX (PDF).....	89
Figure 3-12 - Contenu du rapport détaillé	91

Figure 3-13 - Informations sur le fichier dans un rapport PDF	92
Figure 3-14 - Informations sur le signal dans un rapport PDF	92
Figure 3-15 - Information de l'enregistrement dans un rapport PDF	93
Figure 3-16 - Onde résiduelle dans un rapport PDF	94
Figure 3-17 - Exemple de graphique de fréquences dans un rapport PDF	95
Figure 3-18 - Tableau regroupant les fréquences principales dans un rapport PDF	96
Figure 3-19 - Tableau représentant les détails de l'événement analysé dans un rapport PDF ..	96
Figure 3-20 - Tableau représentant les causes et les origines dans un rapport PDF	97
Figure 4-1 - Création de données synthétiques ; Nom de la feuille Excel	100
Figure 4-2 - Création de données synthétiques ; Entête du fichier	100
Figure 4-3 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre sinusoïdales - Données synthétiques	102
Figure 4-4 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre RMS - Données synthétiques.....	103
Figure 4-5 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre résiduelles - Données synthétiques	103

Figure 4-6 - Tableau regroupant les informations de la perturbation - Données synthétiques	105
Figure 4-7 - Tableau regroupant les fréquences trouvées - Données synthétiques	105
Figure 4-8 - Fréquences de la phase Va - Données synthétiques	106
Figure 4-9 - Fréquences de la phase Vb - Données synthétiques	107
Figure 4-10 - Fréquences de la phase Vc - Données synthétiques	107
Figure 4-11 - Informations sur le signal - Données réelles	109
Figure 4-12 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre sinusoïdales - Données réelles ..	110
Figure 4-13 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre RMS - Données réelles	110
Figure 4-14 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre résiduelles - Données réelles	111
Figure 4-15 - Tableau regroupant les informations de la perturbation - Données réelles	112
Figure 4-16 - Tableau regroupant les fréquences trouvées - Données réelles	112
Figure 4-17 - Fréquences de la phase Va - Données réelles	113
Figure 4-18 - Fréquences de la phase Vb - Données réelles	114
Figure 4-19 - Fréquences de la phase Vc - Données réelles	114
Figure 4-20 - Fréquences Va (analyse multiple)	115

Figure 4-21 - Fréquences Vb (analyse multiple).....116

Figure 4-22 - Fréquences Vc (analyse multiple).....116

Liste des symboles

DEI : Dispositif Électronique Intelligent

EMTP: Electromagnetic Transients Program

ESPRIT: Estimation of Signal Parameters using Rotational Invariance Technique

HTML : HyperText Markup Language

OCP : Outil de Classification de Perturbations

RMS : Root Mean Square – Moyenne Quadratique

SQL : Structured Query Language

Lexique

Transitoire(s) : Nom masculin utilisé pour désigner un phénomène éphémère, temporaire.

Utilisé au féminin dans le cadre de ce travail, afin de représenter une perturbation de type transitoire.

Introduction

Avec l'éclosion des travaux portant sur les réseaux électriques intelligents, la qualité de l'onde ou qualité de l'énergie est un concept qui trouve de plus en plus sa place. Ses avancées sont fort utiles au sein des principales organisations liées à la production, au transport ou encore à la consommation de l'électricité. Depuis près de trois décennies, la qualité de l'onde devient un sujet de discussion et de recherche d'importance, puisque que plusieurs aspects économiques en découlent directement. En effet, des enjeux majeurs sont directement liés à la qualité de l'énergie qui est produite et fournie aux différents utilisateurs ou consommateurs. Par exemple, une mauvaise qualité du signal électrique peut engendrer des pertes de productivité et une baisse de la qualité des produits au sein d'entreprises, le vieillissement prématuré des équipements, des défaillances au niveau d'appareillages ayant une plage de fonctionnement électrique restreinte, etc.

De plus, le maintien de la qualité de l'onde devient primordial lorsqu'entrent en jeu différents producteurs d'énergie. Dans l'optique où il est possible pour toute personne de redistribuer un surplus d'énergie sur le réseau afin d'obtenir diverses rétributions, il est impératif que le niveau du service rendu aux autres clients demeure optimal. C'est ici que la qualité de l'onde trouve son importance.

Comme mentionné dans [1], le domaine de la qualité de l'onde est divisé en deux grands segments principaux :

- La surveillance et l'analyse des perturbations au niveau logiciel ;

- La prévention et la résolution des perturbations au niveau physique.

Bien entendu, les deux vont de paire, mais le contenu de ce mémoire portera exclusivement sur le premier axe, soit celui des techniques mises en œuvre afin de détecter et de classifier les perturbations qui surviennent sur le réseau électrique et qui portent atteinte au principe de qualité de l'onde.

Le but du présent document est de mettre en lumière les dernières avancées effectuées dans le domaine de l'automatisation des réseaux électriques intelligents par le développement d'un outil logiciel permettant d'effectuer l'analyse de la qualité de l'onde sans intervention humaine directe. Plus précisément, le développement d'un module d'analyse dédié à un type de perturbation encore mitigé sera présenté. Ce module sera par la suite implémenté dans une application logicielle présentement développée par l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec. Celle-ci permettra de faire une analyse approfondie des perturbations, de manière simple et intuitive à l'aide d'une interface conviviale.

Le présent mémoire est organisé de la façon suivante :

Le chapitre 1 définit, d'une part, l'expression « qualité de l'onde » et présente les différents instruments de mesures ainsi que les techniques utilisées dans le but de recueillir des données techniques qui permettront l'analyse intensive de l'onde électrique délivrée au consommateur. Ensuite, les différentes variantes de la perturbation visée par ce mémoire ainsi que leurs caractéristiques principales sont présentées et détaillées.

Le chapitre 2 renseigne quant à lui sur les méthodes utilisées lors du traitement du signal électrique recueilli par les instruments de mesures. Ces méthodes permettent de déterminer plusieurs caractéristiques essentielles pour l'identification, la quantification et la classification des perturbations enregistrées. De plus, ce chapitre met en lumière les différents développements effectués dans le cadre du présent travail de recherche. Ces méthodes permettent de déterminer efficacement la présence de signaux transitoires dans un signal perturbé et d'en extraire des informations pertinentes.

Le chapitre 3 liste les ajouts effectués spécifiquement dans le développement de l'outil logiciel permettant la détection et la classification de plusieurs types de perturbations à partir de fichiers de données. Ces ajouts concernent principalement le type de perturbation énuméré précédemment.

Le chapitre 4 présente les résultats obtenus face aux différents algorithmes implémentés dans l'application logicielle. Une comparaison est par la suite effectuée afin de constater la viabilité et la précision des algorithmes.

Finalement, une conclusion renseignant sur les travaux futurs associés à ce projet de recherche et répondant à la problématique initiale vient clore ce mémoire.

Chapitre 1 - Outils de mesures et perturbations étudiées

1.1. Qualité de l'onde

La qualité de l'onde se définit comme un regroupement de limites imposées au signal électrique, permettant aux systèmes électriques et électroniques de fonctionner sans perte de performance et sans dégradation. Il s'agit donc là des conditions normales de fonctionnement du réseau électrique. Les différentes limites de la qualité de l'onde régissent les niveaux de tension inférieurs et supérieurs, de même que les fréquences contenues dans le signal produit. Il incombe donc aux fournisseurs d'électricité de respecter ces limites en mettant en place différentes moyens de prévention et de correction. Le consommateur a aussi un rôle à jouer dans le respect de ces limites, puisqu'il ne doit en aucun cas perturber de manière volontaire ou non la qualité de l'onde distribuée. La plupart du temps, le consommateur se doit d'informer son distributeur de toutes charges qu'il souhaite raccorder au réseau et qui pourraient potentiellement affecter la qualité de l'onde. Dans tous les cas, une solution technique est mise de l'avant par le distributeur [2] afin de conserver une certaine qualité de l'onde et le choix d'implantation dépend d'ordinaire de l'aspect économique.

Tel qu'il a été mentionné, les deux axes principaux concernant le respect de la qualité de l'onde se rattachent à la fréquence ainsi qu'à l'amplitude de la tension fournie. Une large description de chacun de ces paramètres, ainsi que leurs impacts sur le réseau et les moyens de les corriger peuvent être trouvés dans plusieurs ouvrages de référence [2][3][4].

La figure 1-1, tirée d'un document [2] fourni par Hydro-Québec à ses usagers, permet de constater les niveaux de tension acceptables, soient les limites imposées par la qualité de l'onde au niveau canadien, par la norme CAN3-C235-83(C2006).

	Conditions marginales d'exploitation			
	Conditions normales d'exploitation			
Réseau monophasé 120/240 V	106 212	110 220	125 250	127 254
600 V	530	550	625	635
Réseau triphasé 4 conducteurs 120/208 V (Y)*	110 190	112 194	125 216	127 220
347/600 V (Y)*	306 530	318 550	360 625	367 635
Réseau triphasé 3 conducteurs 240 V 600 V	212 530	220 550	250 625	254 635
De 1 000 à 50 000 V	± 6 %			

Figure 1-1 - Conditions d'exploitation canadienne

On y remarque les différentes variations possibles du niveau de tension en régime permanent dans des configurations monophasées et triphasées typiques.

Pour ce qui est de la fréquence, sa valeur nominale est de 60 Hz en Amérique du Nord. Cependant, elle dépend des installations liées à la création de l'électricité. Dans le réseau québécois, ces installations sont en majorité de type hydraulique et la fréquence de la tension

est principalement affectée par la vitesse des alternateurs des centrales productrices. Hydro-Québec spécifie que la fréquence du réseau est maintenue à ± 1 % de la valeur nominale, soit dans une plage allant de 59,4 Hz à 60,6 Hz et ce pour au moins 99 % du temps, lorsque compilé de façon hebdomadaire [4].

Un contrôle accru de la qualité de l'onde est nécessaire afin de préserver la durée de vie des différents appareillages connectés au réseau. Cependant, toutes les variations de l'onde ne peuvent pas être contrôlées en temps réel. Certaines sont causées par des perturbations aléatoires, dues à une intervention humaine, animale ou environnementale et sont impossibles à prévoir. D'autres sont même causées par des manœuvres visant à corriger la qualité de l'onde, comme c'est parfois le cas pour les transitoires de tension. Il est donc important de comprendre d'où elles viennent et ce qui les a causées, afin de mettre en place des moyens de prévention.

Dans ce mémoire, il sera question principalement des surtensions transitoires. Il est tout de même important de savoir que plusieurs autres types de perturbations peuvent survenir sur le réseau. Ainsi, le but premier des études et des développements effectués en matière de qualité de l'onde vise à renforcer les moyens mis en place dans les différentes sphères de la production d'électricité afin de réagir rapidement et efficacement aux variations encourues.

Bien qu'il ne sera question que de perturbations transitoires dans l'entièreté de ce document, il est justifiable de résumer les différentes déviations potentielles de la qualité de l'onde. Voici donc un tableau récapitulatif présenté par Hydro-Québec dans son document

portant sur le sujet [2] et qui décrit les différentes variations de la qualité de l'onde ainsi que leurs effets potentiels et les principales institutions touchées.

Caractéristiques		Valeur indicative ou cible ¹¹	Effets possibles lors de variations	Clients principalement touchés
Contrôlées en temps réel	Tension en régime permanent	Cible	Échauffement des équipements	Industriels
	Fréquence en condition normale d'exploitation	Cible	Arrêt de certains équipements	Certains industriels
Contrôlées à la conception	Déséquilibre de tension	Indicative	Échauffement des équipements	Industriels, charges triphasées
	Tensions harmoniques	Cible		Industriels
	Papillotement	Cible	Inconfort visuel	Certains résidentiels
	Variations rapides de tension	Indicative	Arrêt des procédés industriels, mauvais fonctionnement des équipements	Certains industriels
Reliées à des perturbations aléatoires	Coupures brèves	Indicative	Arrêt des procédés industriels, mauvais fonctionnement des équipements	Industriels
	Creux de tension	Indicative		Industriels
	Surtensions temporaires	Indicative		Industriels
	Surtensions transitoires	Indicative		Industriels

Figure 1-2 - Récapitulatif des perturbations et de leurs effets

En résumé, on peut dire qu'il incombe tant aux distributeurs qu'aux consommateurs de veiller à la qualité du service offert.

1.2. Outils de mesure

Afin de détecter les différentes perturbations pouvant affecter la qualité de l'onde, une surveillance continue de cette dernière est nécessaire. Afin de remplir cette tâche, des outils de mesure ont été déployés sur l'entièreté du réseau, plus précisément à des endroits où des événements sont susceptibles de se produire. Ces appareils, appelés *dispositifs électroniques intelligents* (DEI), permettent de recueillir à la fois les tensions et les courants sinusoïdaux observés sur chacune des phases. La figure 1-3 illustre un type d'appareil permettant de recueillir de telles informations. Il en existe plusieurs, mais celui-ci est largement utilisé sur le réseau et c'est à partir de ce type d'appareil que l'acquisition des données présentées dans les chapitres suivants a été effectuée.



Figure 1-3 - Appareil de mesure (compteur) modèle ION 8650 de Schneider

Selon la fiche technique de cet appareil [5], une panoplie d'informations utiles concernant le signal peut être calculées et enregistrées. Par exemple, la tension et le courant

sinusoidal, la puissance active, réactive et apparente par phase ou totale, la fréquence et le facteur de puissance font partie de cette liste. Ces informations sont retenues lorsqu'une perturbation potentielle est détectée. Des analyses de la qualité de l'onde peuvent alors être conduites en temps réel et les informations concernant l'onde à ce moment précis sont enregistrées dans l'appareil. Plusieurs types de perturbations peuvent être détectés par ce modèle précis d'instrument de mesure.

De plus, les informations acquises sur les perturbations détectées peuvent être téléchargées à distance à l'aide de différents protocoles de communication et les données peuvent ensuite être enregistrées dans des bases de données à des fins de consultation ou d'analyse ultérieure. Ceci est particulièrement intéressant dans le cas de l'application qui sera décrite dans ce présent document.

Ces appareils de mesures peuvent être disposés à différents endroits sur le réseau électrique, soit sur les lignes, dans les différents postes de distribution ou aux points communs de couplage (PCC). Leur emplacement est décidé en fonction des potentiels agents perturbateurs situés à proximité, ou à la demande d'un consommateur préoccupé par la qualité du signal électrique qu'il reçoit.

Il faut cependant faire attention, puisque les tensions et les courants d'entrée permis pour ces appareils peuvent se trouver largement en dessous des caractéristiques du réseau au point d'implantation. En effet, la tension d'entrée acceptée varie entre 65 VAC et 120 VAC, tandis que la valeur de courant doit être située sous la barre des 5 A. C'est la raison pour

laquelle des transformateurs de mesure sont parfois nécessaires. Ils permettent alors d'amener les valeurs dans des plages acceptables pour l'appareil de mesure.

Au final, il existe plusieurs fabricants proposant des appareils similaires, possédant tous la capacité d'effectuer la surveillance de la qualité de l'onde. Il suffit alors de choisir celui qui correspond le mieux aux besoins et qui permet de remplir les charges qui lui sont imposées.

1.3. Perturbations transitoires

Dans le cadre de ce mémoire, les perturbations transitoires sont celles qui seront analysées. Il s'agit d'un type de perturbation de la qualité de l'onde qui se caractérise par l'apparition spontanée et temporaire de fréquences induites et qui se superposent au signal établi en régime permanent. De manière générale, les transitoires peuvent être classifiées selon deux principales catégories : impulsives ou oscillatoires. C'est par l'entremise de leur forme qu'elles peuvent être différenciées. Une brève description des principales différences permettra de mieux les distinguer par la suite.

Les ondes perturbées par des transitoires sont décrites comme étant une somme de sinusoides amorties auxquelles un bruit est additionné. L'équation 1.1 démontre la forme que prend ce type de signal.

$$x(t_n) = \sum_{i=1}^P A_i e^{-\alpha_i t_n} \cos(2\pi f_i t_n + \phi_i) + e(t_n) \quad (1.1)$$

Où $x(t_n)$ est la valeur du signal à l'indice de temps n , i est l'indice de l'harmonique, P représente le nombre d'harmoniques contenues dans le signal, A_i l'amplitude initiale de l'harmonique à l'indice i , α_i est le facteur d'amortissement du signal harmonique à l'indice i et varie dans le temps, f_i est la fréquence de l'harmonique à l'indice i , ϕ_i est la phase initiale de l'harmonique à l'indice i et $e(t_n)$ représente le bruit incorporé au signal.

Dans un monde idéal, le signal délivré aux consommateurs par le distributeur ne serait composé d'aucune perturbation, ni de bruit. On en conclut donc que le facteur d'amortissement α_1 doit être égal à 0 pour toute la durée du signal et que les amplitudes $A_2 \dots A_P$ doivent aussi être égales à 0. Ce n'est cependant pas le cas, et plusieurs actions peuvent venir influencer cette onde théorique parfaite.

D'ordinaire, les caractéristiques représentant les transitoires ne tiennent pas compte de la fréquence fondamentale du signal. La perturbation est plutôt isolée de l'onde initiale pour être ensuite analysée.

1.3.1. Transitoires impulsives

Tout d'abord, une transitoire de ce type consiste en un changement brusque de tension, de courant, ou même des deux. De plus, ces variations possèdent une polarité unique, c'est-à-dire qu'elles ne sont observables que d'un côté de l'axe des abscisses. Cette polarité peut être positive ou négative et dépend du moment de l'initiation de la perturbation.

Une transitoire impulsive est généralement caractérisée par son temps de montée ainsi que son temps de recouvrement, qui sont tous deux très faibles. Selon [6], ces transitoires

peuvent aussi être décrites en fonction de leur contenu spectral. Par exemple, une transitoire impulsive $1.2 \mu s / 50 \mu s$ $2000 V$ atteint sa valeur nominale de $2000 V$ à partir de zéro en $1.2 \mu s$ et nécessite $50 \mu s$ avant d'être amortie à 50 %.

Dans la littérature [2][8], on dénote souvent la principale cause de ce type de perturbation comme étant la foudre. La figure 1-4, tirée de [9], illustre le comportement du courant lorsqu'un tel événement se produit. Une forte augmentation de la tension provoque une forte diminution du courant, mais due aux éléments résistifs du réseau ainsi qu'aux très hautes fréquences en jeu dans ce type d'anomalies, la transitoire est rapidement atténuée, soit en moins de $100 \mu s$.

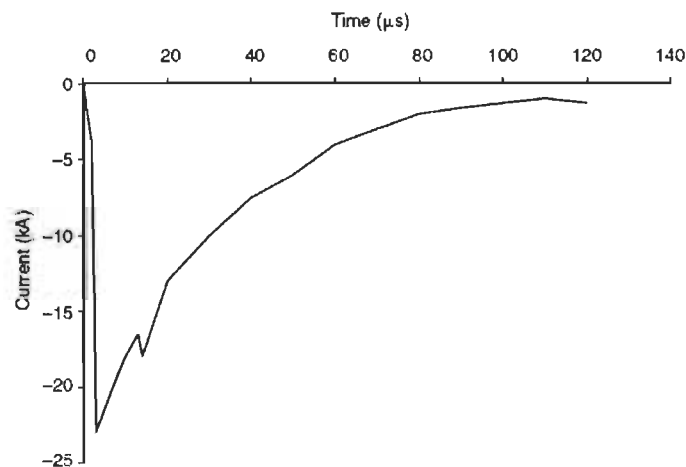


Figure 1-4 - Allure du courant lors d'une transitoire causée par la foudre

La figure 1-5, tirée de [8], démontre quant à elle l'allure générale d'une transitoire impulsive lorsque mesurée dans un réseau de 132 kV.

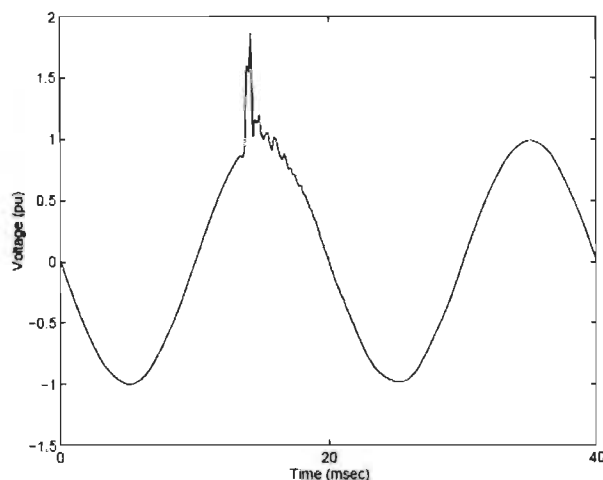


Figure 1-5 - Transitoire de type impulsive

À noter que les surtensions transitoires dues à la foudre peuvent être induites par une frappe à proximité de la ligne et qu'il n'est pas nécessaire que la foudre s'abatte directement sur cette dernière afin de produire ce type de perturbation.

A cause de la nature fréquentielle très élevée de ce type d'événement, il n'est pas rare que les appareils de mesure souffrant d'un taux d'échantillonnage insuffisant ne soient pas en mesure de capter la totalité de la perturbation. Ce faisant, les données exploitables dans le cadre de ce mémoire ne sont malheureusement pas en nombre suffisant. Néanmoins, il sera démontré qu'en utilisant la propriété de polarité, il est possible de classer adéquatement des anomalies de ce type, même sans appareils totalement adaptés.

1.3.2. Transitoires oscillatoires

À la différence des transitoires impulsives, les transitoires oscillatoires varient de part et d'autre de l'axe des abscisses. Toutefois, elles se décrivent aussi comme une variation brusque de la valeur instantanée de la tension, du courant ou des deux à la fois. Tout comme le phénomène défini à la section précédente, elles peuvent être évaluées selon leur amplitude, leur durée, mais aussi par leur contenu fréquentiel.

Lors de la détection et de l'analyse de perturbations transitoires, plusieurs caractéristiques sont extraites. Celles-ci permettent de mieux comprendre les causes ayant mené à la dégradation du signal. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement importantes puisqu'elles permettent de classifier les transitoires et d'émettre des hypothèses les concernant. Il s'agit de la fréquence principale et de la durée.

Le tableau 1-1 représente la classification pouvant être faite à partir des différentes caractéristiques extraites.

Tableau 1-1 - Classification des transitoires oscillatoires

	Transitoires de basses fréquences	Transitoires de moyennes fréquences	Transitoires de hautes fréquences
Fréquence principale	< 5 kHz	5 kHz – 500 kHz	>500 kHz
Durée	0.3 ms – 50 ms	10 us – 0.3 ms	< 10 us

Tel qu'illustré, les transitoires de basses fréquences peuvent être décrites comme possédant une fréquence principale se situant sous la barre du 5 kHz et une durée allant de

0.3 ms à 50 ms. Ce type de transitoire peut être observé tout particulièrement lors de la mise sous tension de banques de condensateurs dans le réseau de distribution [9]. Typiquement, les fréquences observées se situent autour de 300 Hz à 900 Hz et l'amplitude de la tension peut atteindre environ 2.0 pu, mais est généralement de l'ordre de 1.3 pu à 1.5 pu.

Les transitoires oscillatoires de moyennes fréquences possèdent une fréquence principale se situant entre 5 kHz et 500 kHz. Leur durée est de quelques dizaines de microsecondes. Les causes principales à cette classe de perturbations sont la mise sous tension de banques de condensateurs adjacentes, la mise sous tension de lignes ou tout simplement la réponse du réseau face à une transitoire impulsive. Toutes ces causes peuvent produire une perturbation possédant les caractéristiques de cette classe.

Finalement, les transitoires de hautes fréquences possèdent une fréquence primaire de plus de 500 kHz, expliquant leur très courte durée, qui est de quelques microsecondes seulement. Elles sont souvent dues à une action de commutation de la part d'appareils de contrôle d'électronique de puissance, tels des inverseurs ou des contrôles de moteurs. Il est aussi possible que ces fréquences soient induites en réponse du système à une perturbation impulsive.

La figure 1-6 illustre l'allure générale d'une transitoire de type oscillatoire. Vu sa courbe caractéristique, il est possible que cette transitoire soit de basse fréquence et qu'elle ait été causée par la mise sous tension d'une banque de condensateurs. Une analyse poussée, telle qu'elle sera décrite dans la suite de ce document, pourrait valider ce résultat.

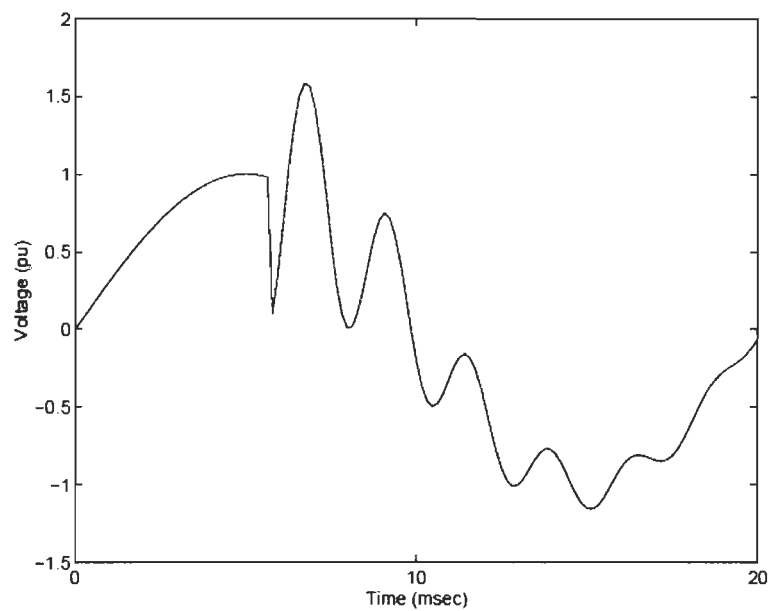


Figure 1-6 - Transitoire de type oscillatoire

La description de ces deux types de transitoires se veut être plutôt sommaire, puisqu'une analyse plus détaillée sera effectuée dans les chapitres qui suivent.

Chapitre 2 - Méthodologie

2.1. Introduction

Afin de parvenir à réaliser les objectifs proposés, soit de développer un module d'analyse des perturbations transitoires qui peut être implémenté au logiciel d'analyse de la qualité de l'onde précédemment mentionné, il est important de bien définir les différents principes qui régissent la qualification des perturbations mises en évidence par l'analyse de la qualité de l'onde. Ces principes portent sur la détection, l'extraction et l'analyse des transitoires contenues dans le signal. Dans un premier temps, le principe de segmentation qui permet de détecter certains types de perturbations sera expliqué et ses principales limitations face aux cas qui importent dans ce document seront exposées. Ensuite, des méthodes s'appliquant particulièrement aux transitoires sont décrites et un aperçu de leurs principaux avantages et inconvénients est proposé. Pour finir, les différents processus permettant d'extraire les caractéristiques révélatrices de ces perturbations sont discutés.

2.2. Segmentation

Les différents signaux qui sont soumis à une analyse de la qualité de l'onde sont généralement récupérés dans des bases de données. De manière générale, ces derniers contiennent des perturbations, mais il arrive parfois que les appareils de mesures se synchronisent sur des signaux sains. Ce faisant, des perturbations peuvent être présentes ou non et celles-ci ne sont pas initialement isolées. En effet, dans la plupart des cas, le signal

extrait consiste en plusieurs cycles échantillonnés à une fréquence fixée par l'appareil de mesure. Celui-ci contient donc une sinusoïde de fréquence fondamentale, augmentée de ses différentes harmoniques et perturbations.

Afin de faire ressortir les anomalies du signal, il est d'ordinaire nécessaire d'avoir recours à un procédé appelé segmentation, qui permet de déterminer les indices de temps où les perturbations commencent et se terminent. Il en résulte différents segments, appelés événements et transitions. Leur signification sera exposée plus loin.

Puisque la segmentation permet de séparer le signal selon certaines conditions [1], plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Par exemple, la segmentation peut être faite au niveau du domaine fréquentiel, au niveau du domaine temporel, ou tout simplement à l'aide de comparaison de modèles.

Au niveau fréquentiel, la segmentation permet de détecter une ou plusieurs variations dans le spectre fréquentiel du signal. Le début ainsi que la fin de la perturbation sont détectés par une variation marquée du spectre fréquentiel. Puisque les perturbations sont souvent caractérisées par un changement brusque dans l'amplitude du signal et que des changements de phase sont régulièrement observés, il est possible que le spectre fréquentiel varie.

Au niveau temporel, c'est l'amplitude du signal qui est observée. Le plus souvent, la valeur efficace du signal est calculée, puisque cette dernière reflète son comportement sur une base de temps allant d'un demi-cycle à un cycle. Ainsi, un changement dans la valeur efficace renseigne sur les moments critiques d'une perturbation. Il faut cependant faire attention, puisque les variations très rapides dans la valeur instantanée du signal ne sont pas forcément

reflétées dans la courbe de valeur efficace et peuvent mener à une mauvaise interprétation en ce qui concerne les moments d'initiation et de fin de la perturbation.

Aussi, il est possible d'utiliser une comparaison à l'aide de modèles connus de signaux. De cette manière, une comparaison point par point de l'onde récupérée avec un signal généré synthétiquement est effectuée. L'avantage de cette méthode est qu'elle est très simple d'utilisation, puisqu'il ne s'agit que d'une soustraction de signaux. Cependant, il est relativement difficile de s'assurer de la validité des résultats, puisqu'un simple déphasage de l'onde synthétique engendre une onde résiduelle non viable et vient ainsi biaiser le reste de l'analyse.

Ainsi, dans le reste du document, l'utilisation de la détection dans le domaine temporel a été privilégiée.

2.2.1. Processus général

De manière générale, la segmentation dans le domaine temporel consiste à comparer la valeur efficace du signal avec un seuil de détection sélectionné par l'utilisateur. Ce seuil est généralement fixé autour de 0.9 pu, permettant alors une variation de l'ordre de 10 % [2]. Cette valeur est fixée en fonction de la tension de référence du signal, c'est-à-dire sa valeur efficace. Lorsque la valeur efficace traverse négativement le seuil de détection pour un certain nombre d'échantillons, qui est lui aussi fixé par l'utilisateur et qui peut dépendre de la fréquence d'échantillonnage du signal, l'événement en cours est terminé et la transition suivante est amorcée. Le changement d'une transition vers un événement se fait quant à lui

lorsque la valeur efficace du signal revient au-dessus du seuil de détection pour une durée continue correspondant au nombre d'échantillons sélectionné.

La segmentation est conduite sur la valeur efficace du signal. Cette dernière correspond à la moyenne quadratique des échantillons du signal au carré, sur un intervalle de temps donné. Elle est notée valeur RMS (*Root Mean Square* ou *moyenne quadratique*) et est représentée aux équations 2.1 et 2.2. Cet intervalle de temps peut varier, mais correspond généralement à des multiples entiers de demi-cycles de la fondamentale. Ce calcul donne la valeur efficace du signal pour un point précis de la courbe. Afin d'obtenir la valeur efficace pour le signal en entier, il est nécessaire d'effectuer ce même calcul en utilisant une fenêtre mobile. Ceci permet de déterminer la valeur point par point, en utilisant une fenêtre de longueur déterminée. La longueur de cette fenêtre influence la précision de la variation du signal. Par exemple, une fenêtre réduite à un demi-cycle expose les changements radicaux dans la forme d'onde, tandis qu'une fenêtre de longueur plus élevée permet d'atténuer certains phénomènes transitoires, un peu à l'image d'un filtre. Ceci simplement puisque la valeur efficace correspond à la moyenne quadratique des éléments qui composent le signal compris dans la fenêtre sélectionnée.

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V^2(t) dt} \quad (2.1)$$

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t_0}^{t_0+T} V^2(t)} \quad (2.2)$$

2.2.2. *Potentielles limitations*

Quelques limitations méritent d'être énoncées, puisqu'elles doivent être prises en compte lors de la segmentation d'un signal. Ces conditions permettent d'effectuer l'analyse de la forme d'onde de manière optimale.

Tout d'abord, dans un système électrique triphasé, la segmentation doit être conduite sur chacune des phases, puisqu'il est possible qu'une perturbation ne survienne que sur une phase en particulier, plutôt que sur les trois phases. De plus, il est probable que les moments d'initialisation et de fin diffèrent d'une phase à l'autre. Ainsi, après la segmentation de chacune des composantes, une comparaison est effectuée afin de détecter efficacement les indices de temps d'initiation et de fin de la perturbation.

Certains ouvrages, comme [1] [10], tendent à déterminer les indices de temps en considérant la moyenne des indices pour chacune des phases, tandis que d'autres [3] considèrent la pire phase, ou alors la pire combinaison de phases. Par là, on entend le premier indice de temps indiquant le changement d'un événement vers une transition ainsi que le dernier indice de temps où une transition devient un événement.

Ensuite, il est à noter que la méthode de segmentation énoncée plus haut ne fonctionne que lorsque la valeur efficace du signal varie de manière significative et ce, pour une durée de temps acceptable, au moins équivalente au nombre d'échantillons énoncé précédemment. Cette méthode trouve difficilement sa place lors de l'analyse du type de perturbations visé par le présent document. Ceci puisque les anomalies de nature transitoire sont généralement de très courte durée, dû à leurs fréquences relativement élevées. De plus, la valeur efficace a

tendance à évoluer dans un sens seulement, majoritairement positif. Ceci signifie que l'analyse se termine souvent par une seule transition et aucun retour au régime permanent initial. Dans la figure qui suit par exemple, la courbe RMS prélevée avec une fenêtre mobile d'un demi-cycle révèle une augmentation de la valeur efficace après la perturbation sans toutefois revenir à la valeur efficace initiale. Tout dépendamment du type de cause reliée à la variation de la tension, il peut arriver que cette-dernière n'excède même pas le seuil de détection fixé. Ceci peut être remarqué lorsque la cause de la transitoire est de nature capacitive, lors de la mise sous tension d'une banque de condensateurs par exemple. Une augmentation de la tension efficace pourra être observée, mais celle-ci ne déclenchera cependant pas de détection de perturbation. Dans la figure 2-1, une transitoire de tension est clairement visible sur chacune des phases lorsque la sinusoïdale est examinée, mais rien de particulier n'est révélé lors d'une analyse de l'onde RMS, telle qu'exposée sur la figure 2-2, sinon qu'une très légère variation. L'allure de la courbe RMS paraît très constante pour l'entièreté du signal et ce, malgré les variations prononcées qui sont observées sur l'onde sinusoïdale.

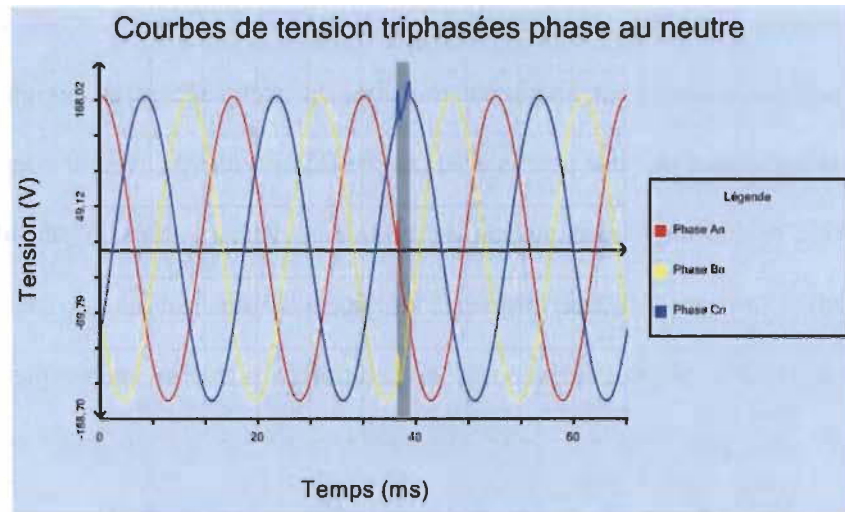


Figure 2-1 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre - Sinusoïdales

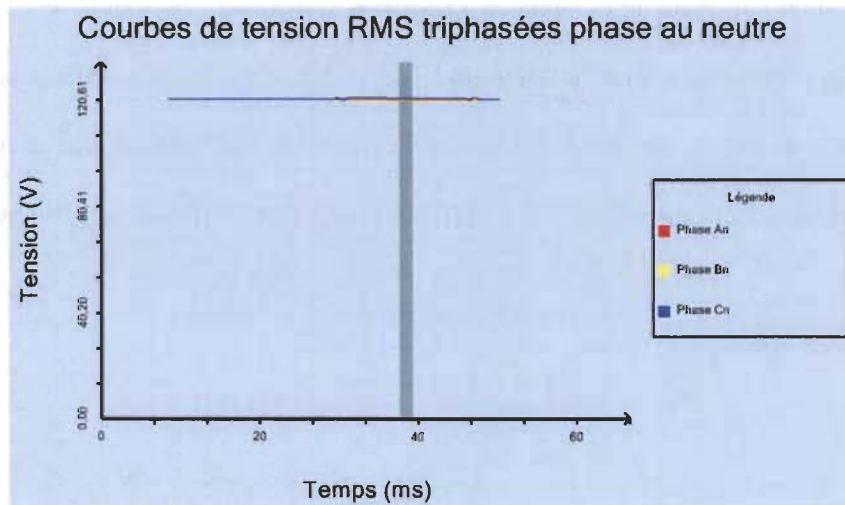


Figure 2-2 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre – RMS

Afin de détecter efficacement les signaux transitoires, on aura généralement recours à d'autres principes [11].

Pour terminer, même si la plupart du temps les appareils de mesures recueillent des signaux ayant une forme sinusoïdale, il arrive que la seule onde à laquelle l'utilisateur ait accès soit de type RMS. Cette dernière, comme il a été mentionné, est directement dérivée de l'onde sinusoïdale, mais ne convient toutefois pas à l'entièreté de l'analyse de perturbations transitoires. Malheureusement, si le signal RMS peut être construit à partir de l'onde sinusoïdale, le contraire n'est pas possible. Dans ces circonstances, l'utilisateur a donc le choix d'abandonner l'analyse du signal en cours ou bien de n'avoir accès qu'à une cause et une origine hypothétiques. En effet, puisque l'onde RMS est une moyenne quadratique des valeurs échantillonnées bornée sur une fenêtre de temps, les variations brusques du signal sont possiblement noyées. Pour cette raison, les transitoires sont rarement détectées à partir de ce type de signal. Toutefois, la majorité des critères importants des perturbations transitoires peuvent être tirés à partir de ces signaux. Les autres, qui seront décrits au long de ce chapitre, nécessitent une analyse de l'onde sinusoïdale. Ces derniers permettent de bonifier les résultats et de classer de manière beaucoup plus précise et soutenue la perturbation affectant l'onde.

2.3. Détection et extraction des signaux transitoires

Tel qu'illustré à la figure 2-2, il est possible que certaines perturbations ne soient pas détectées lorsqu'une onde de type RMS est manipulée. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre au point d'autres méthodes qui pourraient permettre de détecter et d'extraire efficacement les perturbations de type transitoires. Plusieurs auteurs [8][11] proposent des solutions permettant de réaliser cet objectif.

Afin de détecter la présence de transitoire dans le signal examiné, il est tout d'abord possible d'appliquer un filtre passe-haut. Ceci aura pour effet d'éliminer les fréquences situées sous la fréquence de coupure du filtre, en ne conservant que celles situées au-dessus. Cette manière est relativement simple à implémenter de manière logicielle, mais comporte quelques inconvénients. D'abord, la fréquence de coupure du filtre détermine quelle est la fréquence minimale admise dans le signal résultant. Deux problèmes majeurs viennent compliquer la sélection de la fréquence de coupure optimale. Tout d'abord, il est possible que la transitoire contienne une fréquence de valeur relativement basse. Il ne faut donc pas fixer la fréquence de minimale admissible à une valeur trop élevée. Toutefois, cette-dernière ne doit pas être sous-estimée, puisque la fréquence fondamentale aura tendance à être amoindrie, mais pas complètement supprimée. Il est important de fixer la fréquence de coupure suffisamment haute pour ne conserver que les fréquences transitoires.

Le second problème relié aux filtres passe-haut est qu'il est impossible après analyse de déterminer si les fréquences contenues dans le signal appartiennent vraiment à la transitoire ou s'il s'agit simplement de bruit d'échantillonnage, puisque celui-ci se situe généralement dans des plages élevées, de l'ordre des dizaines de kilohertz.

La seconde approche consiste à soustraire le premier cycle du signal échantillonné à chacun des cycles suivants. Bien que cette méthode puisse facilement être implémentée, elle comporte quelques inconvénients non négligeables qui la rendent inutilisable sans intervention humaine. Par exemple, que se passe-t-il lorsque la perturbation se trouve dans le premier cycle échantillonné ? Cette possibilité est bien réelle, puisque tout dépend de l'appareil de mesure ayant relevé l'anomalie. Il existe en effet la possibilité que l'appareil de

mesure ait enregistré une séquence d'échantillons qui contenaient plus d'une perturbation, dont une dans le premier cycle. Il n'est donc pas impossible que le cycle soustrait aux autres soit lui-même perturbé. Le signal résultant prend alors la forme suivante : le premier cycle du signal résultant est égal à zéro pour toute sa longueur, alors que les cycles suivants, qui peuvent être à la base perturbés ou non, oscillent obligatoirement autour de zéro. On en conclut donc, après inspection du signal résultant, que ce sont tous les autres cycles qui sont perturbés, alors qu'il s'agit bien du contraire.

Suite à cette précision, on décide alors de ne pas préconiser cette méthode à des fins de détection de la transitoire.

Une troisième méthode, qui est décrite en partie dans [12] et qui est retenue dans le reste du développement, consiste à bâtir un cycle synthétique ayant une fréquence dominante et une amplitude qui sont toutes deux synchronisées avec celles du cycle en cours. Ce cycle synthétique est ensuite soustrait au cycle perturbé correspondant. De cette manière, on s'assure que pour chaque cycle, l'analyse est faite avec un signal spécifiquement bâti. De plus, il est facile de contourner le problème d'échantillonnage pouvant occasionner un déphasage entre deux cycles, puisque chaque cycle est analysé et reproduit selon ses caractéristiques propres. Mais, comment s'y prendre pour créer un cycle synthétique ayant des caractéristiques d'amplitude, de fréquence et de phase optimales ? Cette méthode n'est pas exposée dans [12], puisque l'amplitude crête du signal ainsi que la phase initiale semblent déjà être connues. Or, on ne peut que fixer la fréquence fondamentale du signal, puisque celle-ci varie en fonction des spécifications du réseau de distribution étudié. En Amérique du Nord, cette dernière est de 60 Hz.

Ensuite, la phase initiale et l'amplitude crête de chaque cycle doivent être déterminées selon les informations disponibles dans le signal perturbé.

L'organigramme présenté à la figure 2-3 expose les principales étapes à suivre afin d'isoler les différentes anomalies dans un signal perturbé.

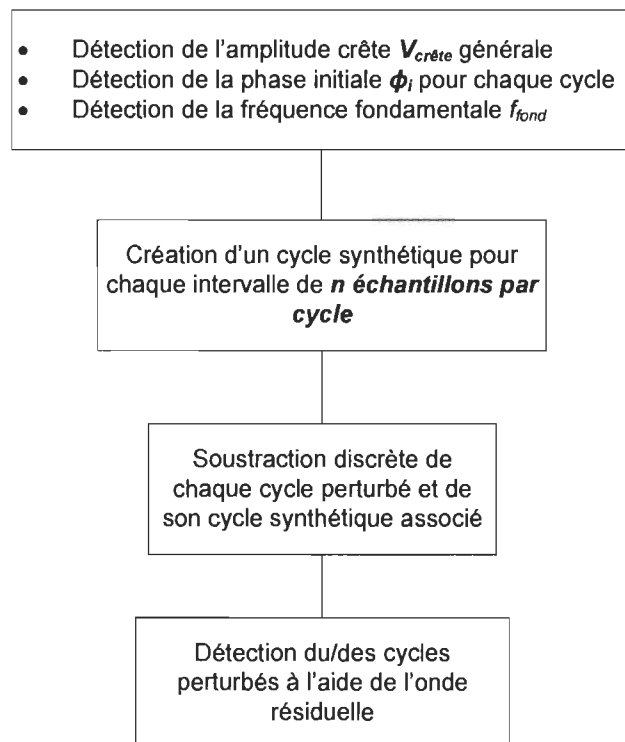


Figure 2-3 - Organigramme d'isolation de transitoires

La première étape suggérée consiste à déterminer les paramètres fondamentaux de l'onde à synthétiser. Dans le but de complètement automatiser le processus, il est important que chaque caractéristique du signal puisse être entrée sous forme de paramètre utilisateur

avant le lancement de l'analyse ou alors qu'elle fasse l'objet d'une détection automatique par le logiciel.

2.3.1. Amplitude crête ou maximale

L'information la plus simple à déterminer est l'amplitude crête ou maximale, notée $A_{crête}$. Cette dernière correspond à l'amplitude maximale atteinte par le signal, qu'elle soit positive ou négative. Initialement, les amplitudes crêtes étaient prélevées de la même manière que les paramètres connexes, c'est-à-dire qu'une valeur était déterminée pour chacun des cycles. Or, cette méthode n'apportait pas de bons résultats, puisqu'il était possible que la perturbation se propage suffisamment longtemps pour venir affecter la valeur crête du signal. Ce faisant, cette dernière pouvait varier fortement d'un cycle à l'autre et fausser les données utilisées dans les prochaines étapes.

Afin de pallier à cette possible lacune, il suffit de déterminer la valeur maximale en examinant chacun des cycles disponibles. Le fonctionnement est fort simple, on détermine les valeurs minimales absolues et maximales qui sont présentes dans chaque intervalle de points correspondant au nombre d'échantillons par cycles. Ensuite, l'amplitude crête moyenne est déterminée en excluant les valeurs aberrantes et en faisant une moyenne des données restantes.

Tel que mentionné, certaines valeurs pourraient être aberrantes, faussant inutilement la valeur moyenne. Il est donc nécessaire de préciser quelle est la condition d'exclusion de ces valeurs. Dans le présent développement, c'est l'écart interquartile [13] [14] [15] qui est utilisé

afin de déterminer si une valeur doit être exclue ou non du calcul de la moyenne. Le procédé consiste à détecter si chaque valeur se trouve à l'intérieur d'un intervalle borné.

$$[Q_1 - k(Q_3 - Q_1)] \leq X_n \leq [Q_3 + k(Q_3 - Q_1)] \quad (2.3)$$

Où n correspond à l'indice du cycle, X_n est la valeur crête du cycle n , Q_1 est la valeur du quartile inférieur, Q_3 est la valeur du quartile supérieur et k est une constante positive généralement égale à 1.5 ou 3 [13]. Cette dernière varie afin de déterminer différentes limites décrites ci-dessous.

Toujours selon le même auteur, cette valeur permet de définir les « limites inférieures » ainsi que les « limites supérieures » de la distribution. La différence entre ces bornes permet de ne pas exclure prématurément une valeur qui semble aberrante, puisqu'il faut s'assurer qu'il ne s'agit pas seulement d'une erreur de manipulation lors de la prise de mesure. Or, dans le cas qui nous intéresse, nous ne considérons que la limite inférieure, puisque le but de cette manœuvre est de reproduire le plus fidèlement possible une onde parfaitement synchronisée avec celle qui est examinée et qu'une valeur légèrement aberrante peut occasionner une mauvaise interprétation des résultats.

L'intervalle décrit par l'équation 2.3 est déterminé en quelques étapes simples. Tout d'abord, les valeurs crêtes qui ont été trouvées pour chacun des cycles sont classées en ordre croissant. La valeur médiane de la distribution est ensuite extraite. Sa valeur correspond à celle qui est située au rang central d'une distribution impaire, tandis qu'elle est définie comme la moyenne des deux valeurs centrales pour une distribution comportant un nombre pair d'observations.

Ensuite, le quartile inférieur Q_1 est déterminé en répétant essentiellement la même procédure, mais cette fois-ci dans la moitié de la distribution inférieure à la médiane. Il s'agit en quelque sorte de la médiane inférieure. On conclut donc que 25 % des données sont situées sous cette valeur.

Afin de déterminer la valeur du quartile supérieur Q_3 , c'est une fois de plus la procédure énoncée précédemment qui est exécutée, à l'exception que la moitié de la distribution qui est située au-dessus de la médiane est celle qui est observée. Le quartile supérieur correspond à la médiane supérieure, puisque 75 % des données de la distribution sont situées sous cette valeur.

Afin d'illustrer les différentes limites proposées, un exemple pratique avec une distribution de données qui sont contenues dans une base de données du réseau électrique d'Hydro-Québec est illustré. Les données suivantes correspondent aux niveaux de tensions crêtes recueillis pour chacun des cycles de la phase Va. À noter que le même développement doit être fait pour chacune des phases lorsqu'une analyse complète est requise et disponible.

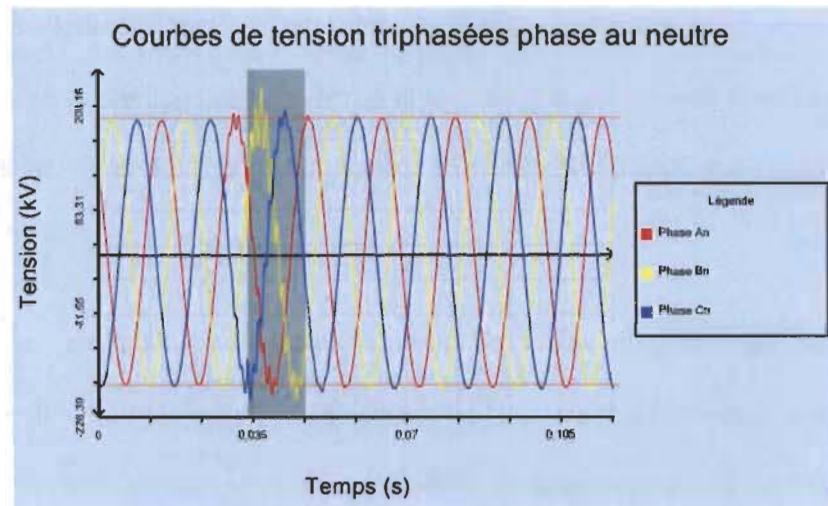


Figure 2-4 - Analyse des amplitudes crêtes

La figure 2-4 illustre la forme d'onde recueillie par un instrument de mesure du réseau électrique d'Hydro-Québec. Les échantillons discrets de chacune des trois phases y sont dessinés. De plus, une ligne horizontale est ajoutée afin de démontrer la valeur crête qui aurait dû être observée sur chacun des cycles si aucune anomalie n'était présente. De cette façon, il est plus facile de remarquer les cycles où la perturbation vient affecter la forme d'onde.

Dans le tableau 2-1, les différentes valeurs représentent les amplitudes maximales et minimales détectées dans l'entièreté du signal.

Tableau 2-1 - Valeurs crêtes non triées

Valeurs maximales et minimales détectées (V)	Cycle
-184 169.456	1
184 670.412	
-183 896.208	2
194 188.566	
-197 330.923	3
191 729.330	
-187 812.769	4
188 313.724	
-186 537.609	5
188 678.056	
-187 402.896	6
188 769.138	
-187 585.062	7
188 541.431	

Ces valeurs sont ensuite transposées en valeur absolue et classées en ordre croissant. De cette manière, il est possible d'effectuer les différents calculs concernant les données aberrantes.

Tableau 2-2 - Valeurs crêtes absolues triées

Valeurs absolues triées (V)	Quartile
183 896.208	25%
184 169.456	
184 670.412	Q1
186 537.609	
187 402.896	Médiane
187 585.062	
187 812.769	188 063.247
188 313.724	
188 541.431	Q3
188 678.056	
188 769.138	25%
191 729.330	
194 188.566	
197 330.923	

La médiane, aussi appelée quartile Q_2 est d'abord trouvée. Puisqu'au total le signal examiné comporte sept cycles et donc quatorze valeurs crêtes, la valeur de la médiane correspond à la moyenne entre la septième donnée et la huitième.

$$\text{Médiane} = \frac{X_7 + X_8}{2} \quad (2.4)$$

$$\Rightarrow \text{Médiane} = \frac{188\,313.724\,V + 187\,812.769\,V}{2}$$

$$\Rightarrow \text{Médiane} = 188\,063.247\,V$$

La valeur médiane étant fixée, on fait maintenant face à une distribution impaire de part et d'autre de cette dernière. Il suffit donc d'extraire Q_1 en lui associant la valeur située au centre de la première moitié. Dans le cas de cet exemple, celle-ci est de 186 537.609 V.

De la même manière, la valeur de Q_3 est fixée à 188 769.138 V, puisque 75 % des échantillons sont situés sous cette limite.

Les principales variables utiles à la détection de données aberrantes étant définies, on détermine la borne inférieure et supérieure, ceci en appliquant les équations 2.5 et 2.6, respectivement.

$$X_{\text{inf}} = [Q_1 - k(Q_3 - Q_1)] \quad (2.5)$$

$$\Rightarrow X_{\text{inf}} = 186\,537.609\,V - 1.5 \cdot (188\,769.138\,V - 186\,537.609\,V)$$

$$\Rightarrow X_{\text{inf}} = 183\,190.316\,V$$

Aussi,

$$X_{nsup} = [Q_3 + k(Q_3 - Q_1)] \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow X_{nsup} = 188\,769.138\,V + 1.5 \cdot (188\,769.138\,V - 186\,537.609\,V)$$

$$\Rightarrow X_{nsup} = 192\,116.432\,V$$

Finalement,

$$183\,190.316\,V \leq X_n \leq 192\,116.432\,V$$

Les données de valeurs crêtes à conserver afin de calculer la moyenne doivent donc se trouver entre les bornes de 183 192.316 V et 192 116.432 V. Toute valeur se situant en dehors de ces bornes est automatiquement rejetée et la moyenne est conduite sur les données restantes selon la méthode suivante :

$$A_{crête} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(i) \quad (2.7)$$

Où $A_{crête}$ est la valeur crête moyennée, N est le nombre de données retenues et $A(i)$ est la valeur d'amplitude retenue à l'index i .

L'avantage majeur de cette méthode est bien évidemment qu'elle permet d'obtenir une valeur moyennée et donc d'utiliser une amplitude crête qui reflète le comportement général et normal de l'onde. Il est cependant important de noter que la précision du résultat dépend directement du nombre de cycles à disposition pour la moyenne, puisqu'un plus grand nombre de cycles signifie une moyenne d'autant plus précise.

Par ailleurs, cette approche peut sembler limitée dans le cas où une perturbation est présente sur plusieurs cycles, puisque le nombre de données non aberrantes et la précision de la moyenne seront diminués.

Enfin, plusieurs autres méthodes [14][15] permettent de déterminer si une distribution contient des données aberrantes ou non. L'approche utilisée est relativement simple à implémenter dans le logiciel développé et permet de facilement borner les valeurs extrêmes.

2.3.2. Phase initiale

La seconde variable importante à déterminer est la phase initiale. Quelques manipulations sont nécessaires afin d'extraire les valeurs désirées. Il faut, dans un premier temps, déterminer tous les points de passage par zéro qui sont contenus dans l'onde examinée. Par analyse logicielle, on privilégie la comparaison du vecteur de changement de valeur du signal pour chaque indice de temps avec celui qui le précède. En d'autres mots, on vérifie si la donnée examinée est de même signe ou de signe opposé à la donnée située à l'échantillon précédent.

Dans le cas où un changement de signe est remarqué, on sait qu'un passage par zéro a eu lieu. Il n'est cependant pas impossible que ce passage par zéro ne soit pas directement attribuable à un changement de polarité relié à un demi-cycle, car une perturbation qui est située près d'un passage par zéro peut effectivement venir affecter l'analyse. Qu'ils soient légitimes ou non, tous les points de passage par zéro sont ajoutés à un vecteur de résultats. Leur validité sera vérifiée ultérieurement. La figure 2-5 représente le signal utilisé dans la section précédente afin de démontrer la méthode de détection de l'amplitude maximale. Les

différents points de passage par zéro, encore une fois pour la phase Va, sont identifiés par des cercles rouges et compilés dans le tableau 2-3.

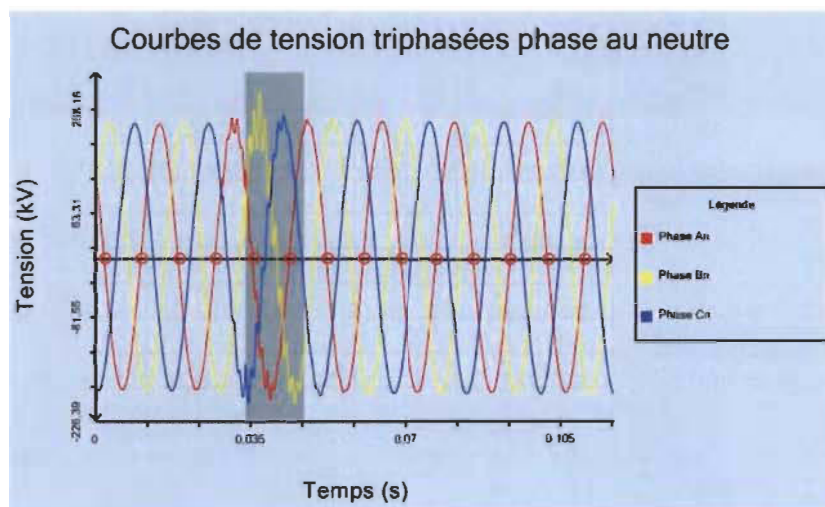


Figure 2-5 - Analyse des passages par zéro

Tableau 2-3 - Vecteurs de changements de signes

Indice de temps pour chaque passage par zéro (s)	Vecteur de changement de signe	Cycle
0.00149766	-	1
0.00983248	+	
0.01816730	-	2
0.02650211	+	
0.03490204	-	3
0.04317175	+	
0.05150656	-	4
0.05984138	+	
0.06817619	-	5
0.07651101	+	
0.08484583	-	6
0.09318064	+	
0.10151546	-	7
0.10985028	+	

Ce tableau représente les valeurs de temps auxquels des changements de signe ont été remarqués. Dans cet exemple, seulement deux changements sont observés à l'intérieur de chacun des cycles, ce qui est tout à fait normal.

Une fois tous les points de passage par zéro isolés, on vérifie le type de transition du premier changement de chaque cycle, car c'est celui-là qui permet de calculer la phase initiale de ce cycle en particulier. Dans le cas où celui-ci est négatif, c'est-à-dire que le signal croise l'axe des abscisses depuis la portion positive du graphique, on peut conclure que la phase initiale est comprise entre $-\pi/2$ et $\pi/2$, ou $\pm 90^\circ$. Dans le cas où le premier passage par zéro est positif, croisant l'axe des abscisses depuis la portion négative, la phase initiale est comprise entre $\pi/2$ et $3\pi/2$ soit entre 90° et 270° .

Afin de déterminer la phase initiale exacte, il suffit d'utiliser les équations 2.8 et 2.9, si la phase initiale se situe entre $-\pi/2$ et $\pi/2$ ou entre $\pi/2$ et $3\pi/2$, respectivement.

$$\varphi_{initiale} = \frac{k_0 \cdot -\pi}{K} + \pi/2 \quad (2.8)$$

Et

$$\varphi_{initiale} = \frac{k_0 \cdot -\pi}{K} + 3\pi/2 \quad (2.9)$$

Où $\varphi_{initiale}$ est la phase initiale, K est le nombre d'échantillons par demi-cycle et k_0 est l'indice de l'échantillon où a lieu le passage par zéro.

Quelques problèmes peuvent cependant se dresser lors de cette conceptualisation. Premièrement, il faut se méfier lorsque la perturbation se trouve près d'un passage par zéro, puisqu'un déphasage sera observé pour ce cycle, même si le second passage par zéro n'est pas affecté. Il en résultera une onde synthétique déformée et une onde résultante non nulle. Pour pallier à ce problème, la solution proposée consiste à répéter la même procédure, en utilisant cette fois le dernier point de passage par zéro pour le cycle affecté. Ensuite, il suffit simplement de soustraire la valeur de π à la seconde phase trouvée et de moyenner le résultat de cette soustraction avec la phase du premier passage par zéro. Afin d'améliorer la précision, on peut aussi répéter cette technique en ajoutant des points situés à des emplacements connus, tels que les maximums et minimums de la courbe. Les seules conditions sont que ces points supplémentaires ne doivent pas être affectés par la perturbation et qu'une valeur de phase représentative y soit soustraite. Il est donc suggéré d'utiliser cette technique seulement si les résultats avec une forme d'onde particulière ne sont pas précis. L'effort de calcul logiciel est donc réduit lorsque non nécessaire.

Deuxièmement, la fréquence d'échantillonnage de l'appareil de mesure peut aussi affecter la précision des résultats. En effet, une fréquence f_s relativement faible, de l'ordre de 32 à 64 échantillons par cycle, produit des résultats nettement moins précis lorsque comparés à ceux engendrés par une fréquence d'échantillonnage plus élevée, de l'ordre de 512 échantillons par cycle ou plus. Puisque la résolution est moins élevée, l'écart entre les valeurs de part et d'autre de l'axe nul est plus important. Des méthodes d'interpolation ou de reconstitution peuvent être nécessaires afin de retrouver la précision qu'offre un appareil de plus haute fréquence.

2.3.3. Fréquence fondamentale

Finalement, la fréquence fondamentale peut être déterminée d'une manière simple et rapide, en utilisant les points de passage par zéro détectés précédemment. En effet, il suffit de déterminer le nombre d'échantillons contenus entre deux passages par zéro consécutifs et d'utiliser la formule 2.10 afin de déterminer la fréquence correspondante. Sachant que mondialement, deux fréquences sont utilisées (50 Hz et 60 Hz), il est trivial de déterminer à quelle fréquence le signal est associé.

$$f_{fond} = \frac{f_{\text{échantillonnage}}}{(N_{\text{échantillons}} \cdot 2)} \quad (2.10)$$

Où f_{fond} est la fréquence fondamentale recherchée, $f_{\text{échantillonnage}}$ est la fréquence d'échantillonnage de l'appareil de mesure et $N_{\text{échantillons}}$ est le nombre d'échantillons détectés entre deux passages par zéro consécutifs.

Cette méthode s'avère particulièrement efficace et peut être facilement implémentée. La seule condition imposée est de connaître la fréquence d'échantillonnage de l'appareil de mesure. Généralement, les bases de données contiennent les renseignements importants sur les signaux enregistrés et fournissent cette information. Autrement, il est possible de calculer la fréquence d'échantillonnage en fonction du temps écoulé entre deux échantillons. Les bases de données renseignent sur la base de temps utilisée et chaque signal est échantillonné de manière discrète, sur une base de temps précise. La formule 2.11 illustre la façon de calculer la fréquence d'échantillonnage selon la base de temps utilisée.

$$f_{\text{échantillonnage}} = \frac{N_{\text{échantillons}}}{\Delta_{\text{temps}}} \quad (2.11)$$

Où $f_{\text{échantillonnage}}$ est la fréquence d'échantillonnage recherchée, $N_{\text{échantillons}}$ est le nombre d'échantillons retenus et Δ_{temps} est la différence de temps entre le premier et le dernier échantillon retenu.

À partir de ce point, les informations nécessaires à la génération des différents cycles synthétiques sont connues et le processus de détection et d'extraction des cycles perturbés peut être amorcé.

2.3.4. Création des cycles synthétiques

Tel qu'illustré dans l'organigramme de la figure 2-3, la seconde étape consiste à créer des cycles synthétiques et ce, à l'aide de l'amplitude crête, des phases initiales et de la fréquence fondamentale trouvés précédemment. L'équation 2.12 permet de réaliser cette démarche.

$$X(n) = A_{\text{crête}} \cos(2\pi \cdot f_{\text{fond}} \cdot n + \varphi_{\text{initiale}}) \quad (2.12)$$

Où $X(n)$ est la valeur du cycle synthétique à l'échantillon n , $A_{\text{crête}}$ est l'amplitude crête du signal, f_{fond} est la fréquence fondamentale et $\varphi_{\text{initiale}}$ correspond à la phase initiale pour ce cycle en particulier.

Il est alors possible de créer un cycle synthétique ayant les caractéristiques d'un signal d'origine non perturbé et ce, pour chacun des cycles perturbés à analyser. Ces nouveaux

signaux sont entreposés dans une grille comportant un nombre de colonnes égal au nombre de cycles et un nombre de lignes qui équivaut la fréquence d'échantillonnage sur la fréquence fondamentale ou plus simplement, au nombre d'échantillons par cycle.

2.3.5. Isolation des perturbations

La troisième étape proposée s'appuie sur une soustraction discrète, faite entre chaque cycle du signal perturbé initial et le cycle synthétique qui lui est associé dans la précédente grille. Les valeurs qui résultent de cette soustraction permettent de créer un nouveau signal.

Celui-ci correspond au signal résiduel, ou résultant. En théorie, ces données ne contiennent que le contenu harmonique du signal initial, puisque la soustraction d'une forme d'onde ayant comme unique fréquence la fondamentale a été effectuée. Lorsque la fréquence d'échantillonnage est de valeur élevée, c'est-à-dire 512 échantillons ou plus par cycles, on obtient un signal résiduel oscillant légèrement autour de zéro pour le ou les cycle(s) qui ne sont pas initialement perturbés et une variation marquée pour l'ensemble des échantillons touchés par la ou les perturbation(s). Ce phénomène peut être observé à la figure 2-6.

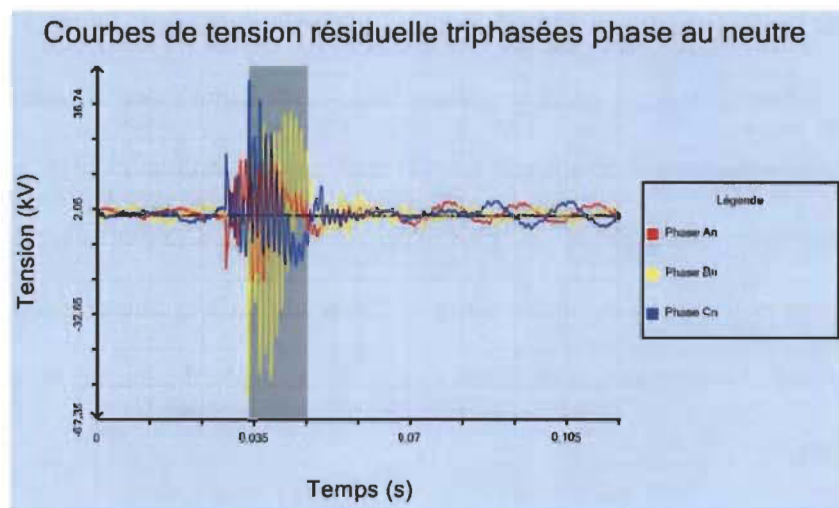


Figure 2-6 - Onde résultante

La figure 2-6 représente le résultat de la soustraction entre chacun des cycles synthétiques qui ont pu être créés grâce aux informations trouvées précédemment et les cycles leur correspondant dans le signal initialement perturbé.

Une analyse rapide révèle une oscillation d'un peu moins de 1 % pour le premier cycle du signal résiduel et une oscillation un peu plus élevée, de l'ordre de 8 % pour les cycles qui suivent celui qui est grandement perturbé. Cependant, on remarque aussi que cette oscillation semble être périodique. Deux explications viennent soutenir ces résultats.

Tout d'abord, le signal synthétique qui a été soustrait au signal perturbé n'était composé que de la fréquence fondamentale de 60 Hz. Il est cependant possible, voire même probable, que le signal initial contienne d'autres fréquences dites harmoniques, de faibles amplitudes, venant fausser légèrement les résultats.

Ensuite, pour certains cycles, la phase initiale ou l'amplitude crête peuvent être légèrement différentes des valeurs approximées, résultant en une valeur soustraite non nulle. Dans l'exemple précédent, il semblerait que les oscillations résultantes aient une fréquence près de la fréquence fondamentale, avec un léger déphasage en rapport avec l'onde initiale aux mêmes indices de temps. Cette erreur dans l'estimation de la phase initiale peut être la cause de cet effet. Nous remarquerons plus loin qu'il est facile d'identifier le cycle perturbé dans cet exemple.

2.3.6. *Détection des cycles perturbés*

La quatrième et dernière étape avant l'analyse des perturbations transitoires consiste à isoler les cycles qui sont perturbés, en fonction de l'onde résiduelle. Pour ce faire, la méthode adoptée est fort simple et s'appuie sur la comparaison du signal résiduel avec une valeur seuil. Ce paramètre est fixé par l'utilisateur dans l'application logicielle. Appelé *seuil de détection*, il permet de faire varier la sensibilité de l'algorithme.

En effet, une faible valeur pour ce paramètre forcera l'algorithme à adopter un comportement beaucoup plus réactif, c'est-à-dire qu'une petite erreur dans le calcul de l'amplitude crête ou des phases initiales pourrait mener à une détection prématurée ou non-désirée d'une perturbation transitoire à l'intérieur d'un cycle. Ceci puisque une mince variation de l'onde résiduelle autour de l'axe des abscisses déclencherait une détection. Il est recommandé, en considérant les possibilités d'imprécision dans la création des cycles synthétiques de comparaison, de fixer le seuil de détection à une valeur avoisinant 15 % de la valeur maximale, soit 0.15 pu. Cette valeur est en accord avec l'exemple précédent où une

variation maximale d'environ 8 % pouvait être observée dans les cycles non perturbés. La valeur fixée ne se doit pas d'être absolument optimale, puisqu'elle ne sert qu'à déterminer des variations excessives dans le signal. Au final, il est important de s'assurer de détecter les cycles fautifs, mais pas les variations reliées au régime permanent du signal ou aux imprécisions des étapes précédentes.

L'entièreté du signal résiduel est comparée, un échantillon après l'autre, avec le seuil de détection établi. Dès le moment où la valeur du signal pour un échantillon se trouve au-dessus du seuil, le cycle auquel cet échantillon appartient est considéré comme perturbé. C'est ici que le choix de la valeur du seuil trouve son importance. Bien sûr, il est possible de filtrer ces comparaisons, en s'assurant d'avoir plusieurs points au-dessus du seuil avant de déclarer le cycle comme perturbé. Ce choix est laissé à la discrétion de l'utilisateur et amène une dimension de sensibilité supplémentaire à l'algorithme de détection.

L'équation 2.13 permet de déterminer de manière simple dans quel cycle se trouve un échantillon en particulier :

$$Cycle = \frac{n}{N} \quad (2.13)$$

Où *Cycle* est le numéro de cycle perturbé, *n* est l'échantillon détecté et *N* est le nombre d'échantillons par cycle.

La valeur de *cycle* trouvée doit être arrondie à l'entier supérieur afin de déterminer adéquatement le cycle contenant l'échantillon. Il est possible que la perturbation soit amortie sur plus d'un cycle, ou qu'il y ait plusieurs perturbations distinctes dans le signal. La présente

interprétation ne vise qu'à extraire les valeurs de cycles ou des valeurs non usuelles sont présentes.

Un critère important à prendre en compte lors de la comparaison du signal résiduel avec le seuil de détection est que ce dernier est fixé selon une valeur exclusivement positive. Or, le signal qui lui est comparé se propage de part et d'autre de l'axe des abscisses. Ceci a donc pour effet d'éliminer toute variation négative du signal, puisque celles-ci seront toujours plus petites que le seuil lui-même.

Il y a deux méthodes applicables afin de contourner ce problème : soit le signal est comparé à la fois à un seuil positif et à un seuil négatif, ou alors il est mis en valeur absolue et comparé uniquement avec un seuil positif. La seconde option est celle privilégiée, puisqu'il sera montré dans les sections suivantes qu'il est de toute façon nécessaire d'effectuer cette opération sur le signal afin de récupérer certaines informations supplémentaires lors de l'analyse.

La phase de préparation de l'onde est maintenant terminée, les informations nécessaires à l'analyse du signal perturbé sont recueillies et cette-dernière peut être conduite sur les cycles isolés. Cette future analyse permettra de déterminer les caractéristiques qui sont intéressantes en vue d'une classification de la perturbation encourue.

2.4 Extraction des informations pertinentes

Afin de classer une perturbation, il est primordial de bien la quantifier. Cette démarche vise à extraire des informations de base sur le signal qui fait l'objet de l'analyse, afin de pouvoir lui attribuer des statuts spécifiques. Plusieurs méthodes de quantification peuvent être utilisées. Dans cette section, les différentes informations requises afin de bien classer les perturbations de type transitoire sont mises en lumière et les méthodes privilégiées pour y parvenir sont expliquées.

Les signaux transitoires contiennent plusieurs informations qui permettent de déterminer efficacement la cause et l'origine possible. Celles-ci peuvent être listées comme suit :

- Les indices de temps marquant le début et la fin de la perturbation transitoire ;
- La durée totale de la transitoire ;
- L'amplitude à l'initiation de la perturbation ;
- L'amplitude maximale de la perturbation ;
- Les fréquences contenues dans le signal ;
- Le facteur d'amortissement de chacune de ces fréquences ;
- Le type de transitoire ;
- L'apport de puissance active et réactive ;
- La variation du facteur de puissance ;
- La cause possible de la transitoire ;
- L'origine possible de la transitoire ;

Dans le cadre de ce mémoire, un paramètre se voit attribuer une certaine importance. Il s'agit des fréquences contenues dans les transitoires. La méthode utilisée afin de mettre en évidence le contenu fréquentiel de celles-ci demande quelques manipulations et il est nécessaire de déterminer plusieurs paramètres secondaires afin d'isoler le paramètre principal recherché. Le cheminement effectué sera exposé dans la section suivante.

Cette méthode repose sur l'algorithme d'estimation des paramètres du signal par l'utilisation de méthodes d'invariance rotatives (en anglais *Estimation of Signal Parameters using Rotational Invariance Techniques, ESPRIT*).

2.4.1. Paramètres fréquentiels

Cette méthodologie, grandement discutée et utilisée dans plusieurs ouvrages [7] [8] [10] [12], permet d'isoler les caractéristiques fréquentielles d'un signal bruité. L'amplitude initiale de chaque fréquence ainsi que son facteur d'amortissement et sa phase initiale sont des caractéristiques mises en évidence lors de l'utilisation d'ESPRIT. Quelques conditions sont cependant essentielles au bon fonctionnement de l'algorithme. Premièrement, le signal analysé doit avoir l'allure d'une sinusoïde amortie. Ceci est parfait puisque tel qu'il a été illustré au premier chapitre, les signaux transitoires prennent généralement la forme d'une somme de ce type de signal. De plus, l'onde analysée doit avoir comme premier échantillon la valeur maximale du signal et doit se prolonger jusqu'à l'amortissement complet de la transitoire.

La procédure générale lors de l'utilisation de l'algorithme est illustrée dans l'organigramme de la figure 2-7. Cette dernière, largement simplifiée, illustre les étapes à

suivre afin de préparer le signal à une analyse avec ESPRIT. Il est à noter que plusieurs paramètres qui sont trouvés lors de l'utilisation d'ESPRIT répondent directement à la liste des paramètres nécessaires à la classification d'une perturbation transitoire.

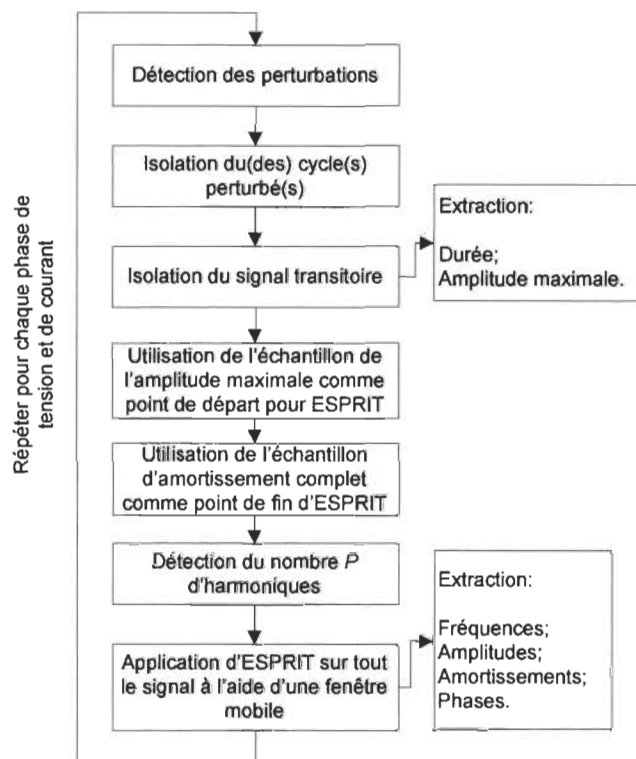


Figure 2-7 - Organigramme d'application d'ESPRIT

Les deux premières étapes ont été exposées à la section précédente, puisqu'elles consistaient à détecter et isoler le signal perturbé du reste des données.

Afin de bien comprendre les méthodes utilisées et les raisons pour lesquelles elles ont été choisies, un rapide survol des différentes problématiques liées à l'automatisation complète du processus est nécessaire.

Selon la définition et le principe d'utilisation de l'algorithme décrit ci-haut, il apparaît évident que l'automatisation complète du processus n'est pas simple et que quelques hypothèses de départ doivent être formulées [16]. Puisque l'algorithme ESPRIT semble être parfaitement applicable au problème de détection des fréquences et de leurs caractéristiques, il vaut la peine de s'y attarder.

Tout d'abord, le point d'initiation $t_{début}$ ainsi que le point de fin de la transitoire t_{fin} sont connus. De plus, le nombre d'harmoniques P qui composent le signal transitoire doit aussi être connu. Une bonne estimation de ces paramètres se révèle très importante pour la suite des développements.

De toute évidence, aucune de ces deux hypothèses n'est respectée, puisque l'utilisateur et le logiciel ne peuvent pas prévoir ces valeurs avant l'analyse du signal. De plus, elles peuvent changer d'une analyse l'autre, rendant impossible la mise en place de valeurs prédéfinies, comme c'est le cas pour certains paramètres illustrés dans les sections précédentes.

Au final, ces hypothèses requièrent toutes l'intervention d'un humain, rendant le processus d'automatisation incomplet. Les paragraphes suivants présentent les principales méthodes utilisées dans le cadre de ce projet afin de contourner les problématiques précédemment énumérées et permettre l'utilisation de l'algorithme de détection des fréquences sur une base totalement autonome.

2.4.1.1. *Durée et amplitude maximale*

Comme il a été décrit à la section portant sur la détection et l'extraction des perturbations transitoires, les cycles du signal original qui contiennent une perturbation ont été mis en évidence. Or, à des fins de bon fonctionnement, le signal transitoire fourni à ESPRIT doit respecter certains critères. C'est la démarche entreprise lors de la troisième étape de l'organigramme. Les cycles qui ont été isolés dans les étapes précédentes contiennent tous les échantillons. Or, un nombre spécifique d'échantillons doit être retenu pour des fins d'analyse. Ce nombre correspond à l'intervalle compris entre l'indice de début $t_{début}$ et l'indice de fin t_{fin} et est notée *durée*.

$$Durée = t_{fin} - t_{début} \quad (2.14)$$

Selon [10], les indices de début et de fin de transitoire peuvent être identifiés en comparant la valeur absolue du signal avec un seuil de détection fixé par l'utilisateur. La perturbation débute au moment où l'onde dépasse positivement le seuil pour la première fois, alors qu'elle se termine au moment où un dépassement négatif du seuil se produit pour la dernière fois. Bien que le seuil soit une fois de plus variable et qu'il puisse être modifié par l'utilisateur, sa valeur recommandée est fixée à 15 %, soit 0.15 pu. Un peu de la même façon qu'illustrée à la section précédente lors de la détection de perturbations transitoires, la variation de ce seuil entraîne une sensibilité plus ou moins grande.

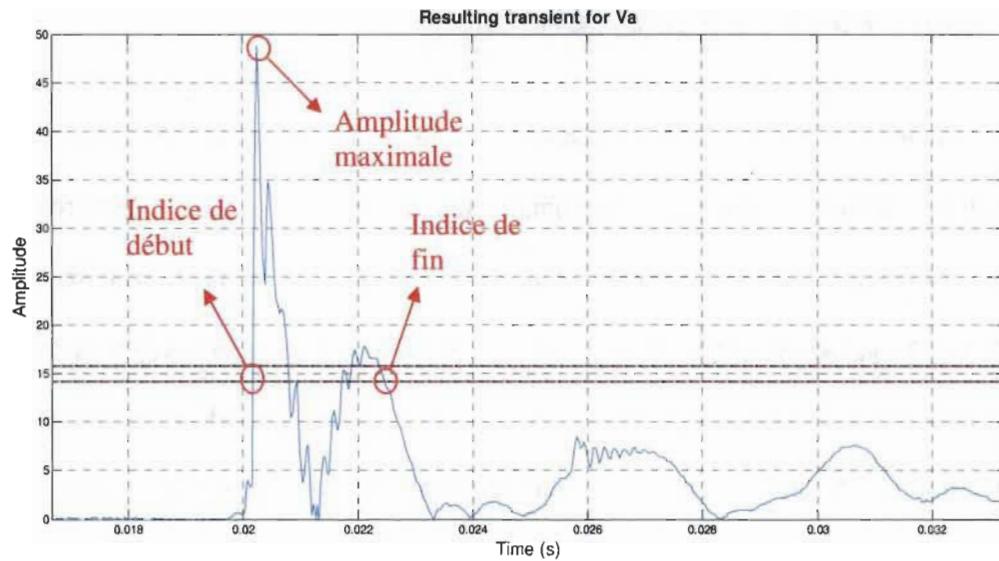


Figure 2-8 - Indices de transitoire

La figure 2-8 démontre une transitoire isolée dans un échantillonnage de données recueillies sur le réseau électrique d'Hydro-Québec. Les étapes de détection et d'isolation de la perturbation ont été volontairement omises. La valeur absolue du signal résultant est affichée en bleu et une ligne horizontale représente le seuil de détection sélectionné. Ainsi, la durée totale de la transitoire peut être déterminée selon l'équation 2.14. Toutefois, tel qu'il a été indiqué au début de cette section, cette durée sert d'information complémentaire lors de la quantification de la perturbation, mais n'est pas la référence de durée utilisée par l'algorithme ESPRIT.

Cette dernière correspondra plutôt à la différence entre l'échantillon de t_{fin} et l'échantillon où l'amplitude est maximale, t_{max} . Dans l'exemple de la figure 2-8, la valeur crête se situait dans les alentours de -49 V, mais a été mise en valeur absolue, ce qui reflète la

valeur de 49 V. Finalement, la section du signal initial qui est prise en compte lors de l'analyse par ESPRIT doit contenir tous les échantillons compris entre l'indice de temps t_{max} et l'indice de temps t_{fin} .

Ces dernières manipulations peuvent facilement être intégrées dans le principe d'automatisation de l'analyse, puisqu'elles ne requièrent qu'un balayage de l'onde afin de déterminer les trois caractéristiques principales, soit : l'indice de début $t_{début}$, l'indice de fin t_{fin} et l'indice d'amplitude maximale t_{max} .

2.4.1.2. Nombre d'harmoniques P

Afin de rendre la réalisation de la seconde hypothèse de départ complètement autonome, il faut évaluer le nombre d'harmoniques contenues dans la transitoire, soit le facteur P . Cette donnée n'est pas initialement connue, puisqu'elle dépend de plusieurs facteurs externes, tels que l'emplacement de l'outil de mesure sur le réseau, le type d'équipement occasionnant la transitoire, l'impédance du circuit au point de connexion, etc. Il faut donc développer une méthode permettant de déterminer ce nombre théorique d'harmoniques le plus précisément possible. Les effets d'une mauvaise estimation de ce paramètre sont les suivants : un nombre d'harmoniques en dessous du nombre réel ne permettra pas de reconstituer le signal de manière efficace, alors qu'un trop grand nombre d'harmoniques fera en sorte que l'onde reconstituée tiendra compte du bruit ou des erreurs de mesures des appareils. Il vaut cependant mieux surestimer le paramètre P , puisque le bruit induit dans l'onde a généralement une amplitude relativement faible et ne vient que très légèrement fausser le signal reconstitué.

Plusieurs approches sont proposées afin de déterminer le paramètre P . Dans [17], l'auteur met de l'avant l'idée de fixer le nombre d'harmoniques P de manière itérative, en comparant les résultats de l'algorithme d'une itération à l'autre. De cette manière, on s'assure de déterminer le nombre d'harmoniques offrant le meilleur signal reconstitué parmi les itérations. Cette méthode fonctionne bien et ne nécessite aucun calcul préalable, mais oblige d'effectuer plusieurs itérations de l'algorithme ESPRIT en modifiant à chaque fois le nombre P . De plus, elle demande beaucoup de ressources logicielles et implique un délai de traitement de l'onde largement augmenté, puisqu'il faut plusieurs itérations afin d'être en mesure de couvrir toutes les possibilités.

D'autres méthodes, par exemple l'utilisation d'un critère de longueur de description minimale [18] qui permet d'optimiser la valeur du modèle à utiliser, peuvent apporter une approximation du nombre d'harmoniques. Une fois de plus, cette méthode demande plusieurs calculs et augmente ainsi le risque de divergence entre les résultats et la réalité.

Puisque l'algorithme ESPRIT est basé sur la décomposition du signal en sous-espaces, c'est-à-dire en un sous-espace de bruit et un sous-espace de signal, il est possible d'utiliser les valeurs propres du signal entier comme outil de discernement entre les fréquences appartenant au signal et celles appartenant au bruit en utilisant une valeur seuil. Cette dernière est déterminée par une variation rapide dans les valeurs propres trouvées. Ceci est possible puisque généralement, le ratio signal sur bruit est passablement élevé, c'est-à-dire que l'amplitude du signal est beaucoup plus importante que celle du bruit, ce qui le rend négligeable.

Afin de discerner chaque sous-espace, il incombe avant tout de trouver les valeurs propres du signal entier. Les valeurs recueillies sont classées en ordre décroissant. Par observation et de manière générale, les premières valeurs propres sont d'ordre beaucoup plus élevé que les celles se situant au bas de la liste. De plus, la distribution prend l'allure d'une courbe exponentielle négative. La figure 2-9 présente un exemple d'une telle distribution. La courbe en bleu illustre bien une tendance exponentielle négative alors que l'histogramme en rouge représente les valeurs standardisées pour la même distribution.

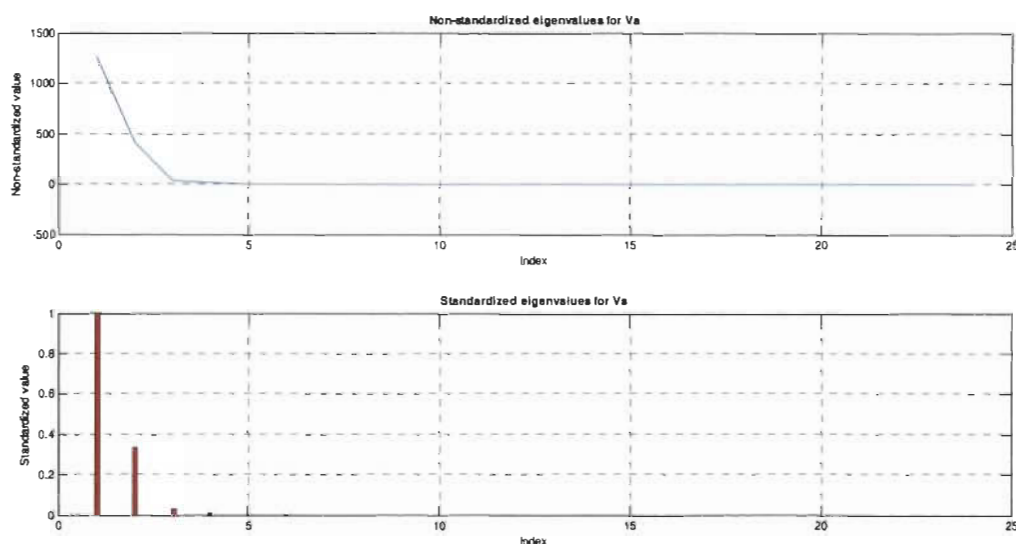


Figure 2-9 - Valeurs propres standardisées

La raison pour laquelle les valeurs propres doivent être standardisées est simple : la solution qui est mise de l'avant afin d'identifier les paires de valeurs propres appartenant au sous-espace du signal consiste à évaluer le ratio entre chaque valeur et la valeur maximale de la distribution, soit la donnée située dans le haut de la liste. Puisque le but de la démarche est

de définir un seuil standard et que ce seuil ne doit pas être modifié par l'utilisateur à chaque nouvelle analyse et ce même si chaque signal analysé possède des caractéristiques différentes, il est primordial qu'il soit attribué sur une base universelle. La valeur propre maximale se voit donc attribuer une nouvelle valeur de 1, alors que les autres deviennent un prorata de cette dernière. L'équation 2.15 démontre la manière d'effectuer ces calculs.

$$Y_n = \frac{x_n}{x_1} \text{ pour } 1 \leq n \leq N \quad (2.15)$$

Où Y_n est la valeur propre standardisée, X_n est la valeur propre initiale, X_1 est la valeur propre initiale maximale, n est l'index en cours de conversion et N est le nombre de valeurs propres trouvées pour le signal entier.

Ce faisant, on obtient une nouvelle liste de valeurs propres qui pourront être comparées à un seul seuil de détection. Celui-ci sera le même, peu importe le signal analysé par l'algorithme. Afin de déterminer quelle est la valeur adéquate à attribuer au paramètre seuil, plusieurs analyses ont été effectuées.

Les signaux utilisés lors de ces analyses étaient aussi bien de nature synthétique que réelle. Le but de cette manipulation était dans un premier temps de fixer une valeur initiale, basée sur l'analyse de signaux qui ne contenaient aucun bruit externe et dont le contenu fréquentiel était connu. En effet, ces différents signaux avaient un nombre précis d'harmoniques et toutes les informations qui leur étaient propres étaient contrôlées. Les amplitudes, les phases initiales, les fréquences et leurs facteurs d'amortissement étaient préétablis, permettant ainsi de faciliter l'analyse. La méthodologie est fort simple : la

procédure d'extraction des valeurs propres est effectuée, ces dernières sont classées en ordre croissant et une corrélation des résultats est réalisée afin de déterminer dans quel intervalle se situe le seuil à utiliser afin de déterminer adéquatement toutes les fréquences en jeu. Sachant que le nombre de valeurs propres qui doivent se trouver dans le sous-ensemble du signal est égal à deux fois le nombre de fréquences harmoniques, on détermine que le seuil correspond à la valeur située à l'index N , égal à deux fois le nombre d'harmoniques.

Suite à plusieurs essais, la valeur suggérée pour le seuil de détection du signal est fixée à 0.0001. Avec cette dernière, le nombre de fréquences harmoniques correspondant le mieux au signal est sélectionné.

Le seuil de comparaison précédemment sélectionné a ensuite été appliqué à des cas réels, où le nombre d'harmoniques en jeu était inconnu. Le même procédé fût appliqué et le nombre de paires de valeurs propres à retenir pour l'analyse était alors déterminé par la quantité de données se trouvant au-dessus du seuil. Si par exemple les cinq premières valeurs étaient supérieures à la limite, les trois premières paires étaient retenues.

Cette technique utilise des méthodes mathématiques simples et n'influence pas l'effort logiciel nécessaire puisque les valeurs propres du signal analysé doivent absolument être calculées dans la démarche complète d'ESPRIT. Par ailleurs, il est important de mentionner que cette technique fonctionne marginalement mieux lorsque le signal comporte peu de bruit, c'est-à-dire que le ratio signal sur bruit est très élevé. Ceci puisque la démarcation entre le signal réel et le bruit est évidente.

Bien qu'une valeur soit préconisée, le paramètre seuil n'est pas fixe et peut être modifié par l'utilisateur. Les effets d'un seuil mal ajusté ne sont cependant visibles que lors de la reconstitution du signal à l'aide des informations trouvées. Un seuil fixé à une valeur moindre occasionnera un signal contenant des composantes de bruit, alors qu'une valeur surestimée réduira le nombre de fréquences contenues dans l'onde finale. Il vaut donc mieux diminuer la valeur de ce paramètre et gagner en sensibilité que de l'augmenter et perdre en précision.

2.4.1.3. Application d'ESPRIT

Les hypothèses de départ étant maintenant complètement automatisées, les grandes lignes du fonctionnement de l'algorithme utilisé se doivent d'être définies. Cet algorithme permet d'extraire des informations telles : les fréquences contenues dans le signal, leurs amplitudes, les phases initiales et les facteurs d'amortissements. L'algorithme ESPRIT est expliqué en détails dans plusieurs ouvrages lui étant spécialement dédiés [7] [19] [20], mais les grandes lignes servant à son implémentation logicielle se doivent d'être énumérées.

Définissons d'abord la portion du signal initial qui doit être utilisée par ESPRIT. Tel qu'indiqué précédemment, cette-dernière s'apparente à :

$$z(t_k) = [s(t_{max}) \dots s(t_{fin})] \quad (2.16)$$

Avec les indices de temps trouvés à la section 2.4.1. Ce signal correspond à la transitoire isolée du reste de l'onde initialement perturbée, à partir de l'indice de temps où celle-ci est maximale, jusqu'à son amortissement complet.

De manière générale, la première moitié de ces données est utilisée par ESPRIT pour l'estimation des fréquences et des facteurs d'amortissement, alors que la totalité des valeurs est utilisée pour déterminer les phases ainsi que les amplitudes initiales [10].

Considérons d'abord,

$$y(t_k) = [z(t_k) \dots z(t_{k+M+1})]^T \text{ avec } (M > P) \quad (2.17)$$

Où $y(t_k)$ est l'onde qui sert à l'estimation des fréquences et des facteurs d'amortissement, $z(t_k)$ est l'onde isolée et M est le nombre de données retenues. Ce nombre doit être plus grand que le nombre d'harmoniques P estimé précédemment et est généralement fixé à la moitié des valeurs disponibles.

La première étape de la démarche consiste à calculer la matrice de covariance R des échantillons retenus. Cette matrice est présentée sous la forme suivante :

$$R = \frac{1}{M} \sum_{t_k=1}^M y(t_k) y^T(t_k) \quad (2.18)$$

Une matrice carrée de dimension $M \times M$ est ainsi obtenue. Les valeurs propres ainsi que les vecteurs propres de cette matrice de corrélation sont ensuite extraits, arrangés en ordre décroissant et attribués de la symbolique s .

Les P premiers vecteurs propres s sont sélectionnés et la matrice S est formée telle que :

$$S = (s_1 \dots s_p) \quad (2.19)$$

Où S est la nouvelle matrice de vecteurs propres et s_1 à s_p sont les vecteurs propres sélectionnés.

Le nouveau vecteur S est ensuite séparé en deux sous-espaces S_1 et S_2 .

$$S_1 = (I_{M-1} \ 0)S \quad (2.20)$$

$$S_2 = (0 \ I_{M-1})S \quad (2.21)$$

Où I_{M-1} est une matrice identité de dimension $(M-1) \times (M-1)$.

Ces deux nouveaux sous-espaces sont ensuite combinés selon l'équation suivante et les valeurs propres en sont extraites.

$$\psi = (S_1^T S_1)^{-1} (S_1^T S_2) \quad (2.22)$$

Et

$$(c_1 \dots c_p) = \text{eigenvalues}(\psi) \quad (2.23)$$

Ces valeurs propres servent à déterminer les fréquences ainsi que les facteurs d'amortissement associés au sous-ensemble du signal. Ces paramètres sont déterminés à l'aide des équations 2.24 et 2.25.

$$f_i = \frac{\text{angle}(c_i)}{\Delta t \cdot 2\pi} \quad (2.24)$$

Et

$$\alpha_i = -\frac{\ln(|c_i|)}{\Delta t} \quad (2.25)$$

Où Δt est la fréquence d'échantillonnage du signal, connue ou déterminée selon les équations contenues dans les sections précédentes.

Les P fréquences contenues dans le signal ainsi que leurs facteurs d'amortissement sont alors connus. Il est aussi possible d'extraire la phase initiale ainsi que l'amplitude initiale pour chaque fréquence. Pour ce faire, il suffit de respecter le développement qui suit.

Tout d'abord, la matrice X est créée en utilisant la totalité des données de la transitoire isolée et définie selon 2.16.

$$X = VH \quad (2.26)$$

Où X est la matrice du signal transitoire retenu,

$$X = [z(t_0) \quad z(t_1) \quad \dots \quad z(t_{N-1})]^T \quad (2.27)$$

V est la matrice de Vandermonde

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ c_1 & c_2 & \dots & c_p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_1^{N-1} & c_2^{N-1} & \dots & c_p^{N-1} \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

Et H est la matrice des coefficients recherchés

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_p]^T \quad (2.29)$$

$$\Rightarrow H = (V^H V)^{-1} V^H X$$

Avec les coefficients de H calculés, les amplitudes sont extraites.

$$A_i = 2|h_i| \quad (2.30)$$

Et les phases initiales correspondent aux angles du vecteur H

$$\varphi_i = \text{angle}(h_i) \quad (2.31)$$

À partir de ce point, toutes les informations concernant les différentes fréquences présentes dans le signal transitoire isolé sont extraites et enregistrées sous forme de vecteur. Il devient donc facile d'y accéder lors de l'analyse logicielle.

L'implémentation de cet algorithme n'est pas des plus simples, puisqu'elle requiert beaucoup de manipulations sur les différentes matrices complexes, par exemple des inversions, des calculs de conjugués, des multiplications, etc. Beaucoup de sources potentielles d'erreurs sont rencontrées et un grand nombre de précautions quant aux différentes valeurs soumises à l'algorithme doivent être considérées. Il faut par exemple s'assurer que des valeurs propres sont bien extraites de l'analyse, que les dimensions des matrices fournies ne sont pas nulles, etc. Cependant, cette méthode donne de bons résultats et son implémentation dans l'application logicielle développée semble être l'avenue à entreprendre.

Quant aux résultats, une réflexion plus poussée en rapport avec les différentes itérations a permis de déterminer que la meilleure méthode à adopter face à l'utilisation de cet

l'algorithme est en conjonction avec une fenêtre mobile. Cette méthode permet de déterminer les fréquences en jeu ainsi que leurs paramètres principaux pour une fenêtre de données spécifique. Le même cheminement est répété en décalant les valeurs utilisées d'un échantillon, jusqu'à complétion de la forme d'onde isolée. De cette manière, on obtient une matrice de résultats comportant plusieurs itérations et il est bien plus évident de déterminer si les valeurs recueillies sont corrélées de quelque façon. On peut par le fait même confirmer ou infirmer des valeurs selon leur degré de présence dans chaque itération. La figure 2-10 illustre cette méthode. L'onde observée est tirée d'un essai effectué sur une onde synthétique comportant trois fréquences harmoniques ayant des paramètres différents.

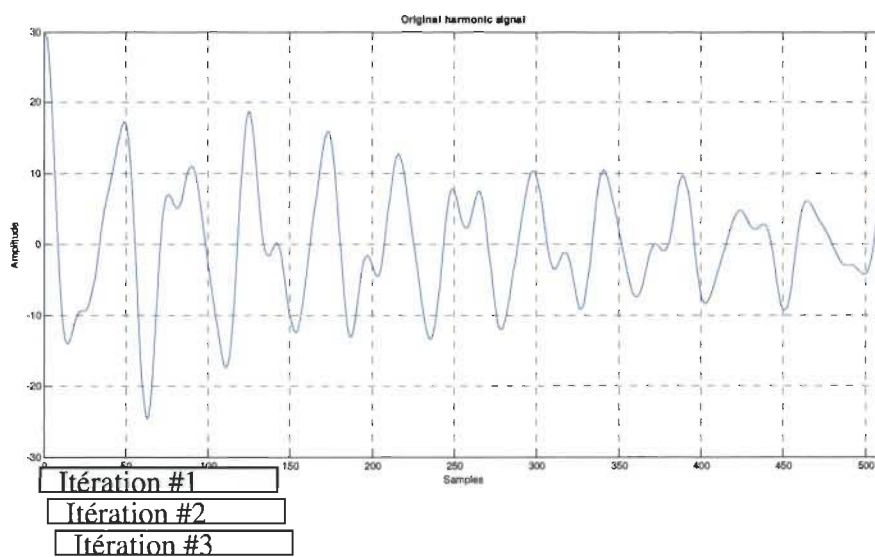


Figure 2-10 - Fenêtre mobile d'ESPRIT

Suite à ces manipulations, la matrice de paramètres créée peut être moyennée ou analysée de quelque manière de sorte à exclure des valeurs aberrantes et à déterminer quels paramètres doivent être considérés. Il s'agit en quelque sorte d'un filtre permettant de

s'assurer de la validité des résultats. Cette étape est non nécessaire et l'analyse pourrait très bien être conduite une seule fois sur l'onde complète afin de limiter l'effort logiciel. Dans un souci de précision cependant, la méthode de l'analyse par fenêtre mobile est préconisée à l'intérieur de l'application logicielle développée.

La largeur de chaque fenêtre est déterminée en fonction du nombre d'harmoniques P recherchées. En effet, plus le nombre d'harmoniques est élevé, plus le nombre de données contenues dans chaque fenêtre devra l'être, diminuant ainsi le nombre d'itérations et par le fait même, la précision des résultats. La longueur minimale des fenêtres d'analyse est décrite par la relation suivante :

$$M = P + 2 \quad (2.32)$$

Où M est le nombre de données à considérer dans chaque fenêtre et P est le nombre de fréquences théoriquement contenues dans le signal.

2.4.2. Caractéristiques globales

Bien que les paramètres fréquentiels jouent un rôle primordial dans l'analyse de signaux transitoires, plusieurs autres facteurs doivent être considérés afin d'obtenir une idée claire de la provenance de la perturbation ainsi que de ce qui l'a causée.

2.4.2.1. Type de transitoire

De ces paramètres, le type de la transitoire peut facilement aider à déterminer à quoi est due la perturbation. Par exemple, les deux principaux types de transitoires ont été

expliqués en début de document, mais leur implémentation logicielle peut être approfondie. Cette information pourrait permettre de rapidement discerner ce qui est en cause dans la création de l'anomalie.

Il a été dit qu'une transitoire pouvait prendre une allure *impulsive* ou *oscillatoire*. Il faut à présent identifier les méthodes utilisées afin d'automatiser le processus d'identification de ce paramètre, le but étant toujours d'éliminer toute intervention humaine dans la classification des perturbations. La méthode qui est implémentée ne s'appuie pas sur l'onde résiduelle isolée, mais plutôt sur une comparaison entre la valeur de chaque échantillon du cycle sinusoïdal perturbé avec la valeur située au même indice dans le premier cycle qui est non perturbé. La valeur du cycle en cours est donc soustraite à la valeur du premier cycle et sa polarité est observée. Ce principe est répété pour tous les échantillons contenus dans ce qui est considéré comme l'onde transitoire.

$$Variation_i = x(t_{M+i}) - x(t_i) \quad (2.33)$$

Où $x(t)$ est le signal sinusoïdal initial, M est le premier échantillon du cycle perturbé, i correspond à l'échantillon comparé et varie de 0 jusqu'au nombre d'échantillons par cycle.

Deux résultats sont alors possibles et reflètent par le fait même les deux types de perturbations transitoires existants. Le premier étant que la polarité observée dans le vecteur de *variation* n'est pas constante, c'est-à-dire qu'elle est parfois positive, des fois négative. Ceci implique que la transitoire est de type *oscillatoire*. La seconde avenue possible est en fait tout le contraire, c'est-à-dire que la polarité est strictement positive ou strictement négative. Dans ce cas, la transitoire est de type *impulsive*.

Il faut apporter un certain bémol à la dernière affirmation cependant. Selon [10], une perturbation transitoire peut être classifiée comme étant impulsive lorsque la polarité est strictement positive ou négative pour au moins 70 % du temps. Ceci permet une très légère fluctuation autour de l'axe des abscisses qui peut se produire lors de la soustraction des deux cycles.

Au final, toute cette approche n'est pas optimale, puisqu'il est possible que le premier cycle soit lui-même perturbé, ce qui viendrait complètement fausser les résultats. Il est aussi possible que l'onde de type sinusoïdale ne soit pas disponible. Dans un tel cas, l'hypothèse du type de la perturbation ne pourrait pas être émise.

2.4.2.2. Variation de la puissance apparente, active et réactive ainsi que du facteur de puissance

Trois autres paramètres qui permettent de bien distinguer la cause et l'origine d'une perturbation transitoire sont la variation de la puissance active, de la puissance réactive, ainsi que du facteur de puissance dans les instants qui précèdent et qui suivent la transitoire. En effet selon [21], ces différents paramètres permettent de localiser la provenance d'un tel type de perturbation, ainsi que sa cause. Leur implémentation logicielle est plutôt simple, mais nécessite cependant la disponibilité des formes d'ondes de courants sinusoïdaux, ce qui peut parfois poser problème.

Les différentes puissances à calculer peuvent être représentées dans un diagramme complexe de la puissance en régime alternatif tel qu'illustré à la figure 2-11.

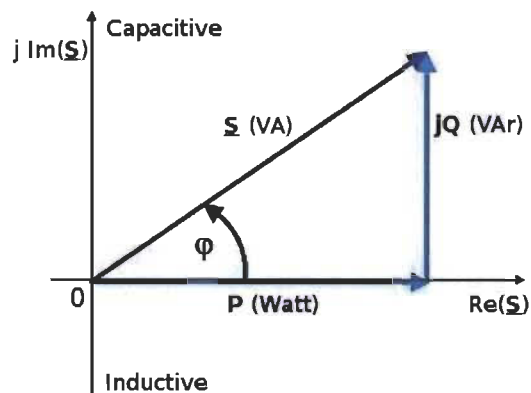


Figure 2-11 - Puissances en jeu

Le calcul de la puissance apparente, notée S est simple à réaliser. Il s'agit d'utiliser la formule 2.34 avec les courbes de valeurs efficaces calculées en début de parcours. Cependant, le critère d'importance avec les puissances réfère à la variation de part et d'autre du cycle perturbé. Il convient donc d'effectuer le calcul sur des échantillons contenus dans chacun des cycles entourant le cycle identifié comme perturbé.

$$S = V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (2.34)$$

Où S est la valeur de puissance apparente en VA, calculée pour des échantillons précis, V_{eff} et I_{eff} sont les valeurs de tension et courant efficaces à ces mêmes échantillons.

Toutefois, pour la puissance active ainsi que pour la puissance réactive, des notions supplémentaires sont nécessaires. En fait, il s'agit simplement de connaître la valeur du facteur de puissance avant et après la transitoire. Le facteur de puissance correspond au

cosinus de l'angle compris entre le vecteur de puissance apparente et le vecteur de puissance active, mais aussi au cosinus de déphasage entre la tension et le courant.

C'est cette dernière affirmation qui est principalement utilisée dans les développements du présent algorithme. En effet, il est possible de calculer le déphasage, en radians, entre la tension et le courant. La seule limitation dans le cas présent est qu'il est impératif d'avoir accès à ces deux signaux, ce qui n'est pas toujours le cas lors de l'acquisition des signaux par les appareils de mesure. Cependant, nous émettrons comme hypothèse que les formes d'ondes en tension et en courant sont accessibles.

La puissance active sera déterminée par la fonction suivante :

$$P = S \cdot \cos(\varphi) \quad (2.35)$$

Où P est la puissance active en W, S est la puissance apparente en VA et $\cos(\varphi)$ correspond au facteur de puissance.

De la même manière, la puissance réactive sera calculée selon l'équation suivante :

$$Q = S \cdot \sin(\varphi) \quad (2.36)$$

Où Q est la puissance active en VAR, S est la puissance apparente en VA et $\cos(\varphi)$ correspond au facteur de puissance.

Afin de déterminer le facteur de puissance, le déphasage entre la tension et le courant doit être observé dans le cycle qui précède le cycle transitoire de même que dans le cycle qui le suit. La manière de procéder est simple et intuitive. Il suffit de déterminer les points de

passage par zéro pour la forme d'onde de courant de la même manière qu'il a été fait plus haut pour l'onde en tension. Ensuite, on détermine les indices de temps où les différents passages par zéro de même polarité se produisent sur chacune des formes d'onde et on observe la différence de temps entre ceux-ci. Il est conseillé de faire une moyenne pour les différentes valeurs de temps trouvés afin d'obtenir une approximation plus précise. Le facteur de puissance est ensuite évalué en comparant la différence de temps entre les passages par zéro similaires et en calculant l'angle de déphasage selon la fréquence fondamentale. Évidemment, ce processus est répété pour le cycle qui suit le cycle perturbé.

Ensuite, les différentes valeurs de puissances peuvent être calculées pour les cycles qui importent selon les équations 2.35 et 2.36.

À ce stade, les valeurs de puissances apparentes, actives et réactives sont trouvées pour le cycle qui précède le cycle transitoire ainsi que pour celui qui le suit. De plus, le facteur de puissance, ou le déphasage, est extrait. Avec ces nouvelles données en main, la comparaison inter-cycle peut être effectuée et aidera dans la détection de la cause et de l'origine de la transitoire.

2.4.2.3. Cause et origine possible de la transitoire

Dans le développement de l'application logicielle, principalement trois causes ont été gérées. Il s'agit des transitoires créés par la foudre ainsi que celles créés par la mise sous tension ou hors tension d'une banque de condensateurs. Ce choix d'implémentation a été fait simplement puisque ces trois causes sont les plus fréquentes sur le réseau.

Tout d'abord, les cas de foudre sont facilement identifiables par leur nature impulsive et ne nécessitent pas de tests supplémentaires. Il suffit de détecter une transitoire ayant une variation strictement positive ou négative pour conclure qu'il s'agit de ce type précis.

En revanche, les mises sous tension ou hors tension de batteries de condensateurs nécessitent plusieurs manipulations, d'une part pour confirmer leur nature et d'autre part afin de déterminer leur provenance, qu'elle soit en amont ou en aval par rapport à la position de l'appareil de mesure. Il est important de noter que la mise hors tension d'une banque de condensateurs n'a pas tendance à produire une forme d'onde proprement dite transitoire et que leur détection est légèrement plus subtile.

Selon [21], plusieurs caractéristiques sont propres aux transitoires d'enclenchements de banques de condensateurs.

Premièrement, on retrouve une attraction de la majorité des phases vers zéro. En effet, il est stipulé que pour un système triphasé, si au moins deux des trois phases se voient être tirées vers l'axe des abscisses au moment de l'initiation de la transitoire, il est fort probable que celle-ci soit due à un enclenchement d'une batterie de condensateurs. Malheureusement, cette conclusion ne peut pas être tirée lorsque l'utilisateur n'a pas accès aux formes d'ondes sinusoïdales. Néanmoins, le principe de confirmation de ce paramètre est relativement trivial. Au moment de l'initiation de la transitoire, c'est-à-dire à l'indice de temps $t_{début}$, une comparaison de la valeur de la courbe en rapport à sa valeur à l'indice précédent est effectuée. Dans le cas où la valeur actuelle est plus près de zéro que celle qui la précède, on considère que cette phase est tirée vers zéro. Le même procédé est répété pour chacune des phases

présentes dans le signal et constitue la première validation concernant la cause de la transitoire.

Deuxièmement, les enclenchements de banques de condensateurs sont généralement accompagnés de larges augmentations temporaires du courant. Dans le cas où ce phénomène est observé à l'initiation de la transitoire, il est plus que probablement que la cause de la transitoire soit de nature capacitive. Le principe de vérification est similaire au précédent, seulement cette fois, ce sont les courbes de courants qui sont observées. Dans le cycle correspondant au cycle perturbé, un seuil de détection de pics est instauré et les différentes phases de courant y sont comparées. Ce seuil est ajustable par l'utilisateur, mais est fixé par défaut à une valeur de 130 %, soit 1.3 pu. Si aucune des trois phases en courant n'atteint ce seuil, la cause de l'enclenchement de banque de condensateurs peut immédiatement mise à l'écart.

Troisièmement, la valeur de la courbe RMS est observée pour le cycle qui précède le cycle transitoire ainsi que pour celui qui le suit. Dû à leur nature capacitive, les condensateurs auront tendance à faire augmenter la valeur efficace de la tension après leur enclenchement et ce, pour chacune des phases. Le contraire peut être observé lors de la mise hors tension d'une banque de condensateurs, où la valeur RMS de chacune des phases sera moindre après la perturbation. Ce paramètre est crucial dans la validation de la cause, puisque si une variation n'est pas observée sur la totalité des phases, il est impossible que la cause puisse être reliée à l'enclenchement ou au déclenchement de condensateurs [21]. Le plus grand avantage de cette condition particulière est qu'elle fonctionne même si l'utilisateur n'a accès qu'aux courbes RMS, contrairement aux précédentes. Il faut cependant être conscient qu'une modification de

l'emplacement de l'appareil de mesure sur le réseau vient directement influencer les variations qui sont observées. En effet, un appareil de mesure positionné en amont de la banque de condensateurs ne relèvera pas les mêmes valeurs qu'un appareil positionné en aval de cette même banque de condensateurs. Ainsi, la tension RMS pourrait rester stable pour celui disposé en amont, contrairement à celui positionné en aval.

Quatrièmement, en plus de fournir une variation de la tension, les banques de condensateurs font varier de la puissance réactive dans le système. Ce faisant, il est possible d'utiliser les critères trouvés dans cette section du document et de comparer la variation de la puissance réactive de part et d'autre de la transitoire. Si cette dernière a augmenté alors que la puissance active est restée sensiblement la même, on peut une fois de plus pencher vers la mise sous tension d'une banque de condensateurs comme cause primaire. Si, au contraire, la valeur de la puissance réactive a diminué après la perturbation et que la valeur de la puissance active est restée la même, on peut mettre de l'avant la mise hors tension d'une banque de condensateurs.

Dans le cas où tous les critères énoncés précédemment sont remplis, on peut immédiatement classer la perturbation comme étant attribuable à la manipulation d'une banque de condensateurs. Malheureusement, comme il a été exposé, plusieurs de ces critères nécessitent une analyse de la forme d'onde sinusoïdale qui n'est pas disponible à tout coup. Que faire alors ?

La réponse se trouve dans la priorisation des critères. Plutôt que d'imposer une validation absolue de chacun de ceux-ci, une valeur d'importance leur est accordée. De cette

manière, les critères les plus importants devront impérativement être satisfaits alors que ceux d'importance moindre viendront renforcer la cause finale, sans pour autant y mettre un frein.

Voici deux tableaux récapitulatifs des critères précédemment mentionnés avec les effets encourus et les priorités qui leurs sont attribuées.

Tableau 2-4 - Priorisation des conditions pour la mise sous tension d'une banque de condensateurs

Description du critère	Effet lorsque mise sous tension de banque de condensateurs	Priorité
Tensions	Au moins 2 phases sont tirées vers 0V à l'initiation de la transitoire	2
Courants	↑↑↑ observées sur plusieurs phases à l'initiation de la transitoire	2
Valeurs RMS	↑ sur chacune des phases après la transitoire	1
Puissance active P	Pratiquement aucun changement après la transitoire	2
Puissance réactive Q	↑ observée après la transitoire	2

Tableau 2-5 - Priorisation des conditions pour la mise hors tension d'une banque de condensateurs

Description du critère	Effet lorsque mise sous tension de banque de condensateurs	Priorité
Valeurs RMS	↓ sur chacune des phases après la transitoire	1
Puissance active P	Pratiquement aucun changement après la transitoire	1
Puissance réactive Q	↓ observée après la transitoire	1

Si l'analyse effectuée permet de valider que le critère de priorité plus élevée est rempli, on considère dès maintenant que la cause de la transitoire est bel et bien associée à la

mise sous tension ou hors tension d'une banque de condensateurs. Il va de soi que la validité de cette hypothèse n'est pas absolue, mais constitue tout de même un bon point de départ lorsque seule l'onde RMS est disponible pour l'utilisateur. De plus, nous verrons dans la section portant sur les futurs travaux possibles comment un nouveau critère permettant de confirmer la cause de ce type de perturbation pourrait être implémenté.

Avec la cause de la transitoire identifiable de manière autonome par le logiciel, seul le critère de l'origine est à démystifier. Puisque les points de connexion des appareils de mesure sont variés, il est important de savoir d'où vient la perturbation. Il peut aussi bien s'agir d'une intervention humaine sur le réseau, d'une cause naturelle, de la mise sous tension de grosses charges inductives en industrie, etc.

Puisque la cause principale observée dans ce mémoire concerne la mise sous tension d'une banque de condensateurs, voici la liste des principaux critères permettant d'affirmer l'origine de la perturbation.

Dans un premier temps, on sélectionne l'origine comme étant en aval du point de connexion lorsque la puissance réactive après la transitoire diminue en comparaison avec celle observée avant la transitoire, que le facteur de puissance augmente et que chacune des phases en tension et en courant ont des gradients de variation opposés. Le manquement à n'importe lequel de ces critères renvoie directement à une origine en amont.

Les gradients de variation opposés sont déterminés en inspectant chaque phase en tension et en courant de manière individuelle. On détermine alors si tous deux varient dans le même sens lors de l'initialisation de la transitoire ou non.

2.5. Conclusion partielle

Dans ce chapitre, la méthode typiquement utilisée pour la segmentation des ondes perturbées a d'abord été détaillée. Les différentes étapes qui la composent ainsi que ses principales limitations ont été exposées. Il a aussi été montré pourquoi, dans un système automatisé à variables multiples, il était difficile d'utiliser cette méthode classique pour la détection des transitoires.

Il a donc été proposé d'utiliser une méthode d'analyse différente afin de pouvoir détecter, isoler et extraire les perturbations de type transitoire spécifiquement. Les différents algorithmes développés afin de détecter et analyser efficacement ces perturbations ont été détaillés. De plus, une liste des caractéristiques primaires des perturbations transitoires a été dressée et les manœuvres implémentées dans l'application logicielle ont fait l'objet d'une explication détaillée.

Suite à ce chapitre, le lecteur devrait être en mesure d'intégrer la détection de perturbations de type transitoire dans un outil de classification automatisé, par l'utilisation de méthodes simples et robustes.

Chapitre 3 - Intégration logicielle

3.1. But général de l'application

Afin d'automatiser le processus d'analyse des perturbations sur le réseau électrique et de faciliter la classification des différentes anomalies rencontrées, les développements présentés dans ce mémoire ont tous été intégrés dans l'interface logicielle, conjointement à ceux qui étaient déjà en place.

À la base, ce logiciel permet à l'utilisateur de conduire différentes analyses sur un ou plusieurs fichiers à la fois. Les fichiers fournis par l'utilisateur peuvent provenir de différentes sources ; le plus souvent, ce seront des entrées contenues dans des bases de données, lesquelles auront été préalablement peuplées par divers instruments de mesure installés sur le réseau électrique. Par contre, il est aussi possible de fournir au logiciel un ensemble de données provenant d'une source autre, à condition que cette dernière respecte un format préétabli.

Les analyses qui sont effectuées sur ces signaux permettent de déterminer le nombre de perturbations présentes ainsi que le type, la cause probable et l'origine de chacune d'entre elles. Une panoplie de caractéristiques importantes permettant leur classification sont par la même occasion extraites.

Le logiciel, nommé *Outil de Classification de Perturbations(OCP)*, se veut être un outil à vocation générale et d'utilisation simple, pouvant être manipulée par toute personne voulant tirer le meilleur de l'automatisation du traitement de signal.

Son utilisation permet de traiter différents types de signaux qui, comme il a été mentionné, peuvent être importés depuis plusieurs types de fichiers. Les signaux sinusoïdaux et RMS sont généralement les deux types principaux qui sont fournis par les appareils de mesure en place sur le réseau électrique.

Une des caractéristiques principales du logiciel est qu'il est en mesure de fournir des rapports très détaillés. Ces rapports contiennent l'intégralité des données fournies aux différents algorithmes ainsi que les résultats et caractéristiques générés par ces derniers. Toujours dans un but de versatilité et de flexibilité, ces résumés d'analyses peuvent être enregistrés sous plusieurs formats, au choix de l'utilisateur, pour consultation ultérieure.

Une description détaillée de l'utilisation de cette ressource est présente dans les sections qui suivent. Il en va de même pour l'intégralité des modifications qui ont été apportées au logiciel *OCP* dans le but de fournir des résultats clairs et des rapports précis, spécifiquement axés sur les perturbations transitoires qui sont analysées.

3.2. Interface utilisateur

L'outil de classification peut être configuré selon les besoins de l'utilisateur. Pour ce faire, l'interface intègre plusieurs fenêtres de configurations, permettant aux différents usagers de paramétrer l'environnement d'analyse comme ils l'entendent, en fonction du type de fichiers analysés, du type de rapport de sortie désiré, etc.

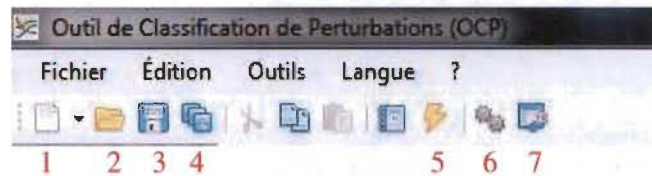


Figure 3-1 - Barre d'outils

Essentiellement, les différents onglets dans le haut de la figure 3-1 contiennent tous des menus qui peuvent être atteints par les icônes de raccourcis qui sont situés juste en dessous. Ces icônes sont identifiées comme suit :

1 – *Nouvelle analyse* :

Ce bouton permet d'accéder rapidement au menu d'importation d'un fichier ou d'un dossier pour analyse. Les fichiers sélectionnés peuvent provenir d'un dossier local, mais une fonction de connexion à différentes bases de données SQL qui contiennent plusieurs formes d'ondes [23] est aussi implémentée.

L'action d'appui par défaut de ce bouton peut être modifiée dans un menu de paramétrage, selon les besoins spécifiques de l'utilisateur ou selon son utilisation la plus fréquente. De cette manière, la méthode d'importation proposée peut varier selon les préférences de l'utilisateur

2 – *Ouvrir* :

Ce bouton permet à l'utilisateur d'ouvrir un fichier de classification déjà existant, à des fins de consultation seulement.

3 & 4 – *Enregistrer et enregistrer sous :*

Comme leur nom l'indique, ces deux boutons permettent de sauvegarder un document d'analyse en cours. Le format d'enregistrement est au choix de l'utilisateur.

5 – *Outil d'analyse rapide :*

En appuyant sur ce bouton, l'outil d'analyse rapide est lancé. Essentiellement, cet outil est une implémentation d'une version antérieure du logiciel, qui est malheureusement moins complète. En effet, une analyse effectuée avec cet outil est beaucoup plus rapide, mais très limitée. Par exemple, il n'est pas possible d'y générer des rapports détaillés et les résultats ne contiennent pas autant de données concernant les formes d'ondes analysées.

L'atout principal de l'outil d'analyse rapide est que l'analyse de l'onde est effectuée en temps réel et que des changements de paramètres, comme différents seuils par exemple, sont immédiatement reflétés dans les résultats.

6 – *Configuration de l'algorithme de classification :*

C'est en appuyant sur ce bouton que l'utilisateur a accès aux diverses pages qui permettent de modifier le comportement global de l'algorithme de détection et d'analyse. La figure 3-2 présente la page qui est affichée par défaut. Par ailleurs, celle-ci ne contient que très peu d'information intéressante dans le cadre du présent document, puisqu'elle ne concerne principalement que les perturbations de type creux ou gonflements. Par contre, deux paramètres peuvent venir influencer les résultats d'une analyse menée sur un signal contenant une perturbation transitoire. Il s'agit de la *taille de la fenêtre RMS* et du *type de classification*.

En effet, le premier paramètre énoncé ci-haut permet de sélectionner la valeur de « Demi-cycle » ou de « Cycle complet ». La différence réside dans le nombre d'échantillons pris en compte pour la fenêtre mobile, lors du calcul de la courbe RMS du signal. Une taille de fenêtre fixée à demi-cycle d'échantillons prévaut dans ce document, puisqu'elle produira un signal RMS plus réactif aux changements. Bien qu'il ait été énoncé dans le chapitre précédent que les perturbations transitoires ne sont pas détectées en analysant ce type de forme d'onde, il n'en demeure pas moins que plusieurs critères de classification en découlent.

Le second paramètre permet à l'utilisateur d'effectuer une analyse en fonction d'une seule phase ou des trois phases, c'est-à-dire que les indices de début et de fin de transitoires peuvent être déterminés en fonction du pire des cas, du cas moyen ou alors de manière individuelle d'une phase à l'autre. Ceci implique aussi que pour un mode triphasé, l'analyse d'ESPRIT devra être conduite sur chacune des phases du signal. Par contre, il sera beaucoup plus évident de déceler des comportements récurrents, puisque les fréquences contenues dans chacune des phases seront extraites, tout comme les autres caractéristiques énumérées au chapitre précédent.

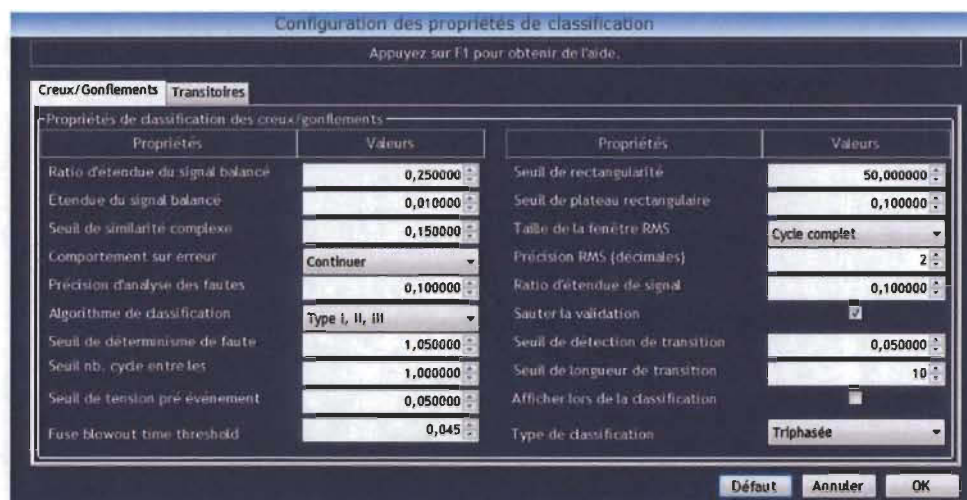


Figure 3-2 - Propriétés de l'algorithme de détection de creux

L'onglet ayant le plus d'intérêt dans cette page est le second, nommé « Transitoires », puisque c'est dans celui-ci que sont contenus tous les paramètres ajustables qui concernent les transitoires seulement. Les seuils de détection, les seuils de variation ainsi que les différents paramètres énumérés tout au long de ce document sont directement modifiables à partir de cette fenêtre. La figure 3-3 démontre les paramètres qui peuvent être modifiés afin de peaufiner les analyses de perturbations transitoires.

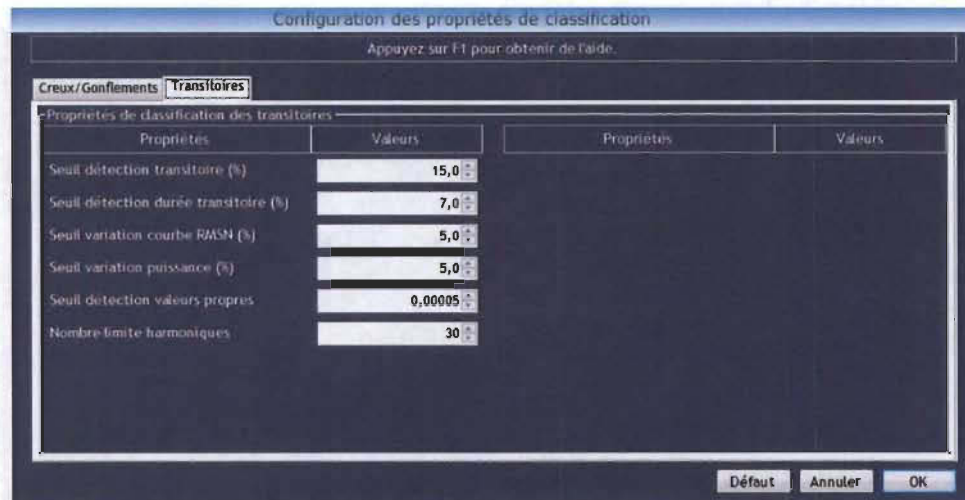


Figure 3-3 - Propriétés de l'algorithme de détection de transitoires

Il est important de tenir compte du fait que chacun d'entre eux influence les analyses à sa manière et il est conseillé de ne modifier qu'un seul paramètre à la fois avant une prochaine analyse. De cette façon, il est plus simple de détecter les valeurs optimales à utiliser.

7 – Configuration de l'application :

Cette page, qui est illustrée à la figure 3-4, permet à l'utilisateur de configurer l'environnement de l'application. De ce fait, il est possible de modifier les chemins d'accès pour les dossiers de sortie, c'est-à-dire le répertoire où les rapports seront automatiquement enregistrés. D'autres paramètres d'importance moindre dans le cadre de ce travail peuvent aussi être changés.

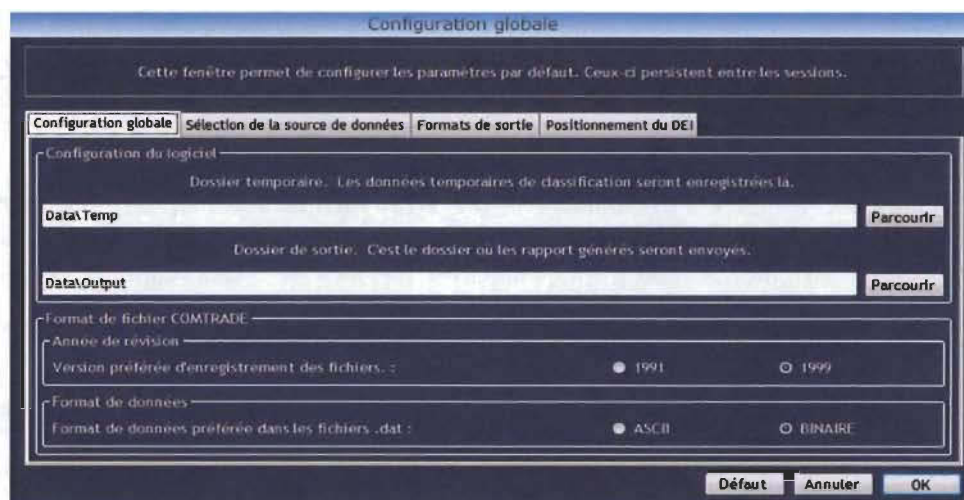


Figure 3-4 - Configuration globale de l'interface

Toujours à partir de cette fenêtre, il est possible de modifier les chemins d'accès et le type de fichier sélectionné par défaut lors d'une nouvelle analyse et de fixer certains filtres de fichiers qui limitent les recherches. L'onglet contenant ces paramètres est illustré à la figure 3-5.

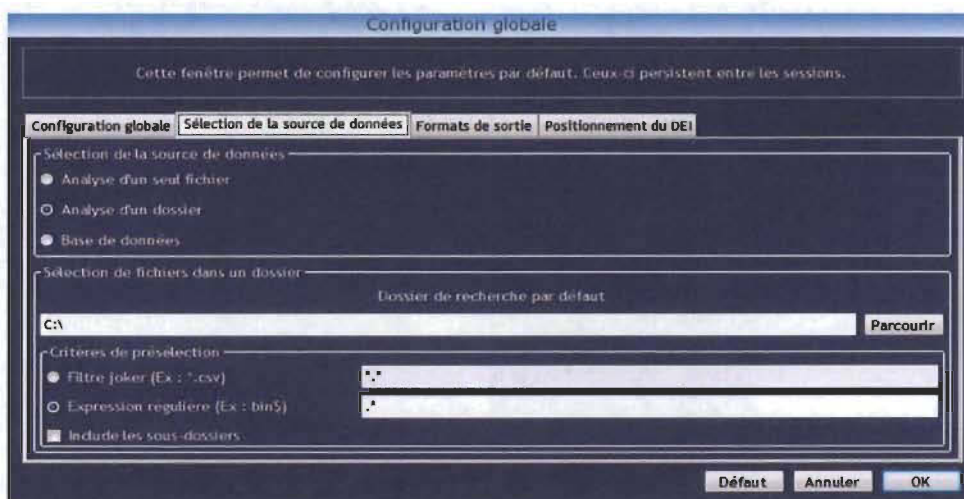


Figure 3-5 - Sélection de la source de données

3.3. Rapport généré

La modification la plus importante qui a été apportée à l'interface utilisateur de l'application OCP dans le cadre de ce mémoire concerne la génération des rapports d'analyse. Comme mentionné plus haut, le logiciel permet de générer différents types de rapports, au choix de l'utilisateur. Parmi ces options se trouvent :

- Portable Document Format (PDF) ;
- Rapport sur Onglet ;
- Rapport HTML ;

Le contenu de ces derniers peut être configuré aux préférences de l'utilisateur, à l'aide de différents critères. Le tout est accessible par le bouton raccourci 7 - *Configuration de l'application*, en allant dans l'onglet *Formats de sortie*, tel qu'illustré à la figure 3-7.

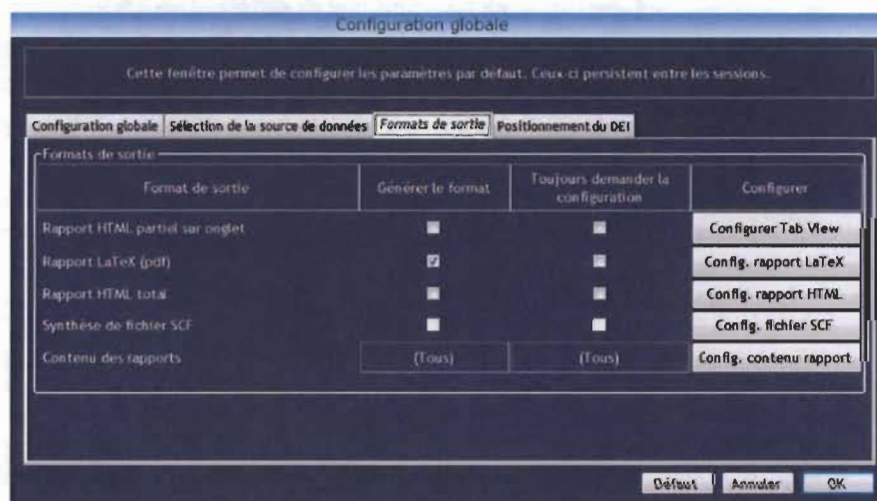


Figure 3-7 - Configuration des types de rapports

Dans un premier temps, il est possible de cocher un ou plusieurs choix de formats à générer et l'utilisateur peut également demander qu'à chaque lancement d'analyse, une confirmation de ces paramètres de sortie soit enregistrée.

Ensuite, les paramètres qui sont universels entre les différents formats peuvent être modifiés par l'intermédiaire d'une nouvelle fenêtre. Celle-ci est accessible en appuyant sur le bouton « *Config. Contenu rapport* ». Cette nouvelle fenêtre, telle qu'elle est visible à la figure 3-8, est alors affichée.

Config du contenu du rapport

Veuillez cocher les données qui devront être calculées par l'algorithme de classification.
Veuillez prendre note que seules les données devant se trouver dans le rapport doivent être cochées.

Données	
Élément	Affichage
Information du fichier	<input checked="" type="checkbox"/>
Information sur le signal	<input checked="" type="checkbox"/>
Information sur	<input checked="" type="checkbox"/>
Résultats de classification	<input checked="" type="checkbox"/>
Classification détaillée	<input checked="" type="checkbox"/>
Notes	<input checked="" type="checkbox"/>

Général		
Élément	Tension	Courant
Signal original	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
RMS (phase à phase)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
RMS (phase à neutre)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Creux/Gonfl.		
Élément	Tension	Courant
Comp. symétriques	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Phaseurs	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Transitoires		
Élément	Tension	Courant
Transitoires résultantes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fréquences	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Défaut Annuler OK

Figure 3-8 - Configuration du contenu des rapports

Il est à noter que si plusieurs types de rapports sont cochés lors d'une analyse, chacun d'eux se voit afficher la même information et que cette dernière est relative aux informations sélectionnées ci-haut. Par ailleurs, peu de ces paramètres ont un lien direct avec les

perturbations transitoires. En effet, seulement les éléments présents dans le groupe *Transitoires* sont pris en compte dans le cas d'une analyse de transitoires.

3.3.1. *Rapport HTML/Rapport sur onglets*

Dans un premier temps, le *rapport HTML partiel sur onglet* et le *rapport HTML total* sont essentiellement du même type. En effet, tous deux produiront des fichiers au format HTML, à la différence que le premier type produira plusieurs onglets à l'intérieur même de l'application pour une consultation immédiate par l'utilisateur, alors que le second type produira plutôt un fichier HTML pouvant être ouvert dans n'importe quel navigateur web. Il est particulièrement intéressant pour un utilisateur qui prévoit regarder les résultats d'une analyse ultérieurement d'opter pour le type de rapport HTML complet. Si toutefois le rapport sur onglets est sélectionné, il est possible d'en effectuer la sauvegarde à l'aide des boutons 3 & 4 – *Enregistrer* et *Enregistrer sous*. Une copie des données contenues dans l'analyse est alors effectuée dans le format de fichier sélectionné.

La figure 3-9 représente l'allure du rapport sur onglets généré par l'application logicielle et affiché à l'intérieur même de celle-ci.

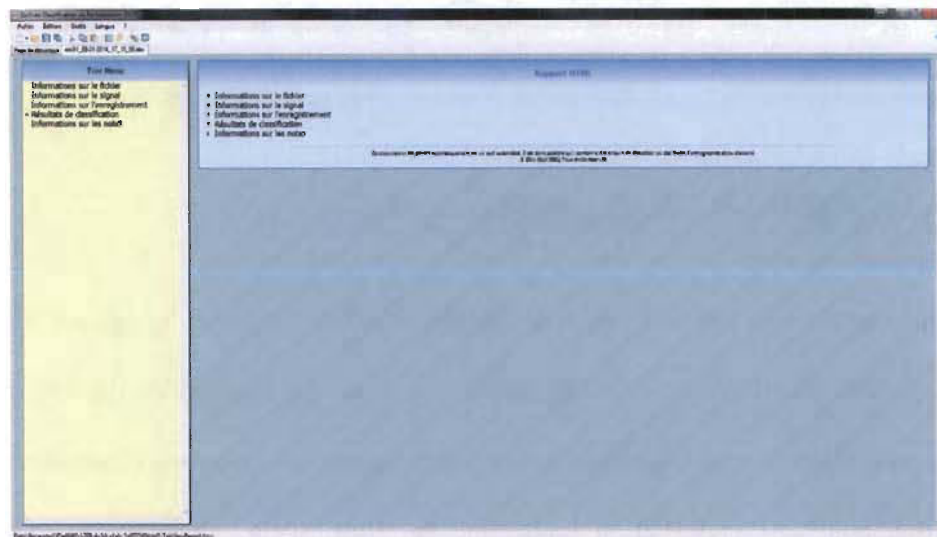


Figure 3-9 - Allure d'un rapport sur onglets

On y voit les différentes sections contenues dans le rapport. Bien qu'elles soient représentées dans un format plus compact, chaque section peut être étendue de manière à bien visualiser les différents résultats.

Dans la figure 3-10, on peut par ailleurs observer l'allure du rapport HTML lorsqu'il est ouvert dans un navigateur web quelconque. Une fois de plus, il est possible d'explorer les différentes sous-sections afin d'examiner les résultats fournis par l'analyse.

On remarque en effet une grande similitude entre les différents affichages, ce qui est tout à fait normal, puisque le rapport HTML se veut être une version portative du rapport HTML sur onglets. On ne s'étonne donc pas d'y retrouver les mêmes dispositions.

The screenshot shows a web browser displaying an HTML report. The report is titled 'Rapport HTML' and contains a table with the following data:

Type de donnée	Présence dans le fichier
Composants temporels	Oui
Formes d'onde des signaux	Oui
Formes d'onde des courants	Oui
Formes d'onde des tensions RMS phase à phase	Non
Formes d'onde des courants RMS phase à phase	Non
Formes d'onde des tensions RMS phase au neutre	Non
Formes d'onde des courants RMS phase au neutre	Non
Formes d'onde des tensions fondamentales	Non
Formes d'onde des courants fondamentales	Non
Composantes harmoniques des tensions	Non
Composantes harmoniques des courants	Non
Résultats de classification de la performance	Non

Below the table, there is a section titled 'Informations sur le signal' with the following data:

Informations sur le signal	Valeur
Nombre de points	2
Type de signal	Stochastique
Échelle de référence LN (RMS) 1/2 RMS (Vrms)	1000000
Échelle de référence LN (RMS) 1/2 RMS (Vrms)	1000000
Précharge	0.01
Nombre d'échantillons	1000
Facteur d'échantillonnage	15.000
Échantillons par cycle	150
Nombre de cycles	2

At the bottom, there is a section titled 'Informations sur l'enregistrement' with the following data:

Informations sur l'enregistrement	Valeur
Nom du dossier d'enregistrement	Aucun nom d'enregistrement
Nom du dossier d'enregistrement	Aucun nom d'enregistrement
Précharge	0.01
Facteur d'échantillonnage	15.000
Échantillons par cycle	150
Nombre de cycles	2

Figure 3-10 - Allure d'un rapport HTML

3.3.2. Rapport LaTeX

Le rapport *LaTeX* (PDF) produira pour sa part un fichier texte formaté à l'aide de l'outil LaTeX. Ce dernier est un outil informatique permettant de faciliter la composition de documents informatisés de taille moyenne ou importante. Il s'agit d'une collection de macro-commandes permettant à l'utilisateur structurer un texte dans un format standard et ce, de manière simple et rapide [22]. L'utilisateur se concentre simplement sur le contenu du document, alors que la mise en page est gérée par le logiciel LaTeX. C'est aussi le cas lors de la création d'équations mathématiques, d'où l'intérêt dans le cadre de l'application logicielle ici présentée.

Le contenu des rapports sous forme PDF est exactement la même que pour les types précédemment énumérés. La seule différence entre ce format et les autres est que celui-ci

produit un fichier pouvant être lu à la fois dans un navigateur web et dans un logiciel capable d'interpréter le type PDF, tel que AdobePDF. Sa nature portative et légère ainsi que son contenu très bien disposé en font un format très pratique lorsque de larges banques d'analyses sont exécutées. La figure 3-11 démontre à quoi ressemble la page titre d'un rapport PDF lorsqu'on l'ouvre avec un logiciel dédié.

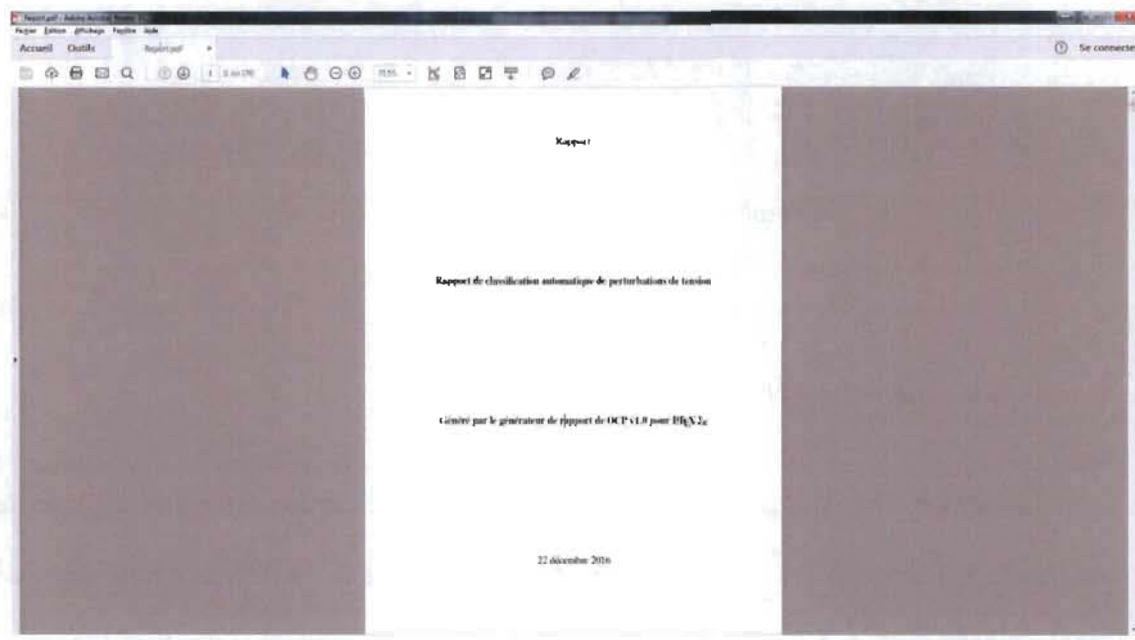


Figure 3-11 - Allure d'un rapport LaTeX (PDF)

3.3.3. Contenu des rapports

Maintenant que les différents types de rapports ont été énumérés, une revue du contenu de ceux-ci s'impose. Selon le type de fichier de sortie sélectionné, le format du rapport ainsi que la mise en page diffèrent. Cependant, l'information présentée demeure la même. En effet, chaque type de rapport peut être configuré de manière à intégrer seulement

les informations les plus pertinentes pour l'utilisateur. De manière générale, ils présentent les informations de la manière suivante :

- Les informations concernant le fichier ;
- Les informations sur le signal analysé ;
- Les informations sur l'enregistrement, ou l'appareil de mesure ;
- Les résultats de classification ;
- Des notes concernant l'analyse en général ;

De plus, les différentes courbes qui ont été générées tout au long de l'analyse peuvent aussi être affichées dans le rapport, afin de donner un aspect visuel à l'utilisateur concernant les données disponibles et les résultats. Il est ainsi possible de voir, dans le rapport final, les courbes suivantes :

- Le signal original, en tension et courant ;
- Le signal RMS, en tension et courant ;
- Les composantes symétriques, en tension et courant ;
- Les phaseurs, en tension et courant ;
- Les transitoires isolées, en tension et courant ;
- Les fréquences trouvées dans le signal transitoire, en tension seulement.

La figure 3-12 présente cette interface. Elle peut être atteinte en appuyant sur le bouton « *Config. Contenu rapport* », ou lorsqu'une analyse est lancée. De cette manière,

l'utilisateur est libre de modifier les caractéristiques affichables dans le rapport avant chaque nouvelle analyse.

Config du contenu du rapport

Veillez cocher les données qui devront être calculées par l'algorithme de classification.
Veillez prendre note que seules les données devant se trouver dans le rapport doivent être cochées.

Données		Général		
Élément	Affichage	Élément	Tension	Courant
Information du fichier	<input checked="" type="checkbox"/>	Signal original	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Information sur le signal	<input checked="" type="checkbox"/>	RMS (phase à phase)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Information sur	<input checked="" type="checkbox"/>	RMS (phase à neutre)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Résultats de classification	<input checked="" type="checkbox"/>	Creux/Gonfl.		
Classification détaillée	<input checked="" type="checkbox"/>	Comp. symétriques	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Notes	<input checked="" type="checkbox"/>	Phaseurs	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Transitoires		
		Transitoires résultantes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		Fréquences	<input checked="" type="checkbox"/>	

Précéd. Annuler Suivant

Figure 3-12 - Contenu du rapport détaillé

Essentiellement, les *informations du fichier* renseignent sur le chemin d'accès du fichier ouvert, ainsi qu'au contenu général de ce dernier. Le tableau regroupant les informations sur le fichier fait état de toutes les formes d'ondes disponibles de prime abord. La figure 3-13 illustre une ébauche de ce tableau lors de la génération d'un rapport PDF.

1 abi211_09-21-2016_17_15_55

1.1 Informations sur le fichier

Fichier : g:\sct-ireq\programmes\formes ondes communes\transitoire\gaétanhétier\condensateurs\abi211_09-21-2016_17_15_55.xlsx

TABLE 1 – Contenu du fichier source

Type de donnée	Présence dans le fichier
Composants temporelles	Oui
Formes d'onde des tensions	Oui
Formes d'onde des courants	Oui
Formes d'onde des tensions RMS phase à phase	Non
Formes d'ondes des courants RMS phase à phase	Non
Formes d'onde des tensions RMS phase au neutre	Non
Formes d'onde des courants RMS phase au neutre	Non
Formes d'onde des tensions fondamentales	Non
Formes d'onde des courants fondamentaux	Non
Composantes symétriques des tensions	Non
Composantes symétriques des courants	Non
Résultats de classification de la perturbation	Non

Figure 3-13 - Informations sur le fichier dans un rapport PDF

Un peu dans le même ordre d'idée, les *informations sur le signal* regroupent, toujours sous forme de tableau, toutes les informations qui ont pu être extraites lors de l'analyse et qui concernent le signal initial. Ce tableau peut être observé à la figure 3-14.

Informations sur le signal	Valeur	
Nombre de phases	3	
Type de signal	Sinusoidal	
Tension de référence LN (RMS)	132790	Volts
Tension de référence LL (RMS)	230000	Volts
Fréquence	60	Hertz
Nombre d'échantillons	1792	Échantillons
Taux d'échantillonnage	15360	Échantillons/seconde
Échantillons par cycle	256	Échantillons/cycle
Nombre de cycles	7	Cycles

Figure 3-14 - Informations sur le signal dans un rapport PDF

Le dernier tableau qui est affiché en début de rapport est celui qui regroupe les *informations de l'enregistrement*, c'est-à-dire toutes les informations relatives à l'appareil de mesure qui a récupéré le signal perturbé. Il y est notamment indiqué le nom du poste où a été relevée la mesure, le type ou le nom de l'appareil de mesure concerné et pour finir, la date et l'heure de la perturbation trouvée dans la forme d'onde. La figure 3-15 présente un exemple de ce tableau.

Information	Valeur
Nom du poste d'enregistrement	Aucun nom disponible.
Nom du dispositif d'enregistrement	Aucun nom disponible.
Horodatage de la première donnée	Aucun horodatage disponible.
Horodatage du point de déclenchement	Aucun horodatage disponible.

Figure 3-15 - Information de l'enregistrement dans un rapport PDF

Suite à ces tableaux informatifs, les formes d'ondes qui ont été fournies initialement sont affichées les unes à la suite des autres. Celles qui ont pu être extraites durant la détection du signal à analyser sont d'abord affichées. Dans un premier cas, les courbes sinusoïdales, les courbes de tensions RMS phase-phase et phase-neutre sont présentées. C'est ce qui vient clore la portion pré-analyse du rapport.

Les sections suivantes sont générées en fonction de l'analyse et comprennent notamment le calcul des courbes RMS, les résultats de la segmentation sur la courbe sinusoïdale ou RMS selon le cas, ainsi que toutes les informations utiles à l'utilisateur et qui renseignent sur la nature de la perturbation traitée.

Tel qu'il a été exposé au chapitre précédent, chaque perturbation détectée dans un signal perturbé est séparée en séquences d'événements et de transitions, peu importe la méthode de segmentation ou de détection utilisée. Dans la génération des rapports, chaque événement est décortiqué et plusieurs informations en sont tirées. Toutefois, un tableau récapitulatif de chaque perturbation est d'abord présenté. Ce tableau contient toutes les informations de la perturbation en général telles que le nombre de segments d'événements, le nombre de segments de transitions, le type de la perturbation, le sous-type de la perturbation, la cause, l'origine, l'indice de temps d'initiation, l'indice de temps de recouvrement, la durée totale ainsi que le point sur l'onde à l'initiation et au recouvrement. De plus, les graphiques représentant les courbes résiduelles triphasées phase-neutre pour les tensions et pour les courants ainsi que l'histogramme des fréquences trouvées par l'algorithme ESPRIT sont affichés. Elles peuvent être visualisées aux figures 3-16 et 3-17. Ce procédé est appliqué à chaque phase disponible dans le signal.

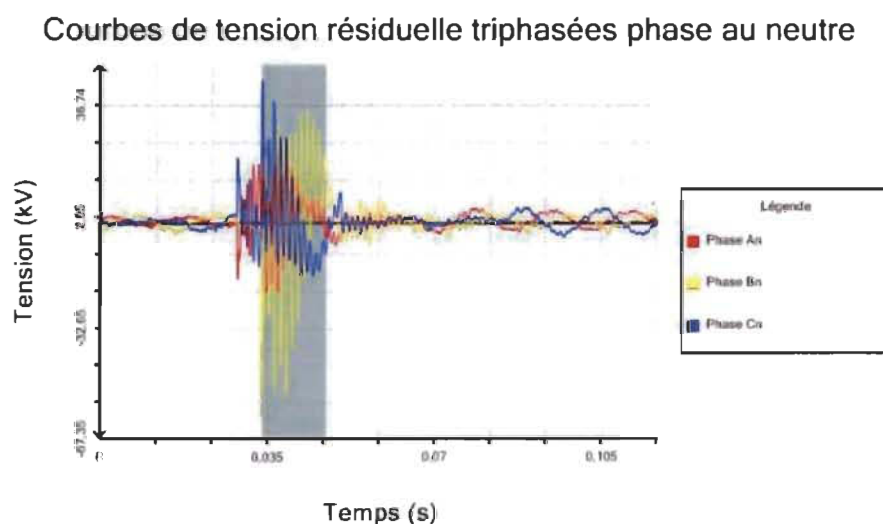


Figure 3-16 - Onde résiduelle dans un rapport PDF

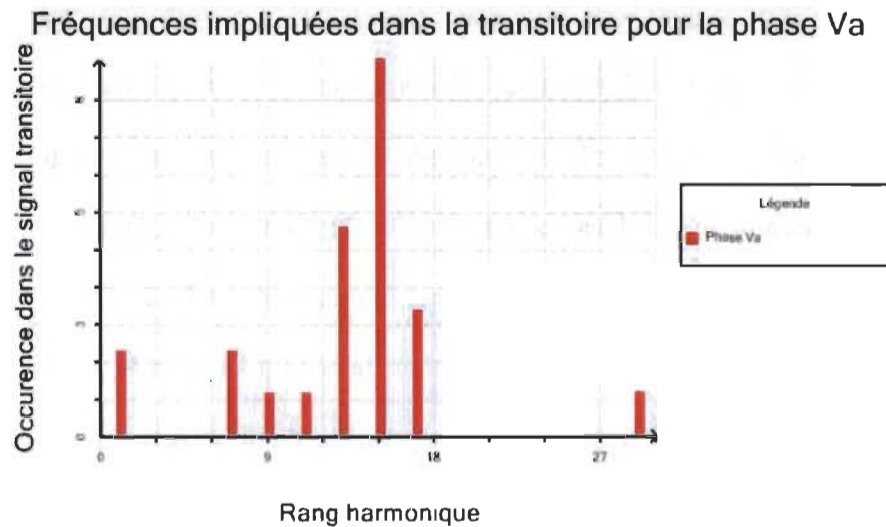


Figure 3-17 - Exemple de graphique de fréquences dans un rapport PDF

La génération de données contenues dans ces graphiques a été discutée précédemment, dans la section traitant de l'algorithme de détection des fréquences. Il est important de spécifier cependant que pour l'histogramme représentant les différentes fréquences trouvées, les valeurs ne correspondent pas à l'amplitude de chaque fréquence dans le signal perturbé, mais plutôt à une occurrence à travers les différentes fenêtres mobiles analysées. Il présente un aspect visuel des résultats et permet de rapidement détecter quelles bandes de fréquences harmoniques sont prédominantes dans la perturbation.

Afin de bonifier les résultats fréquentiels, un tableau contient les fréquences principales trouvées ainsi que leurs amplitudes. À noter que pour l'affichage des fréquences dans le tableau de la figure 3-18, seules les harmoniques situées sous le paramètre seuil (voir la figure 3-3 – Nombre limite harmoniques) sont compilées.

TABLE 5 – Fréquences du signal transitoire pour la perturbation #1

Phases	Harmoniques	Fréquences (Hz)	Amplitude (p.u.)
Va	15	900	0,07
Vb	13	780	0,21
Vc	13	780	0,23
	25	1500	0,05
	27	1620	0,05

Figure 3-18 - Tableau regroupant les fréquences principales dans un rapport PDF

Ensuite, chaque segment d'événement de la perturbation détectée est analysé et un tableau récapitulatif est présenté. On y retrouve la classification de l'événement, l'indice de temps au déclenchement ainsi qu'au recouvrement, la durée totale et le point sur l'onde à l'initiation. La figure 3-19 présente ces résultats sous forme de tableau.

TABLE 6 – Informations sur l'événement #1 de la perturbation #1

Information	Valeur	
Classification du segment d'événement	Pré-perturbation	
Temps initial (relatif au point de déclenchement)	0,008335	Secondes
Temps final (relatif au point de déclenchement)	0,033339	Secondes
Durée	0,025004	Secondes
Point sur l'onde à l'initiation de la perturbation	58,801	Degrés

Figure 3-19 - Tableau représentant les détails de l'événement analysé dans un rapport PDF

Une fois tous les événements analysés, un tableau récapitulatif des différentes causes de perturbations trouvées ainsi que des potentielles origines est exposé et vient clore le rapport dans sa forme actuelle. L'allure de ce tableau peut être observée à la figure 3-20.

TABLE 12 – Distribution des causes dans l'ensemble des formes d'ondes analysées

Causes transitoires	Nombre
Enclenchement d'une batterie de condensateurs	1
Déclenchement d'une batterie de condensateurs	0
Foudre	0
Causes autres	Nombre
Inconnue	0

TABLE 13 – Distribution de l'origine des perturbations de tension dans l'ensemble des formes d'ondes analysées

Origines	Nombre
Aval	0
Amont	1
Inconnue	0

Figure 3-20 - Tableau représentant les causes et les origines dans un rapport PDF

3.4. Conclusion partielle

L'interface utilisateur présentement en place permet aux usagers de configurer l'environnement d'analyse à leur guise, de manière simple. De plus, le logiciel développé permet de générer des rapports sous différents formats, tous regroupant les données ayant servi aux différentes analyses, ainsi que les résultats qui en découlent. Ces rapports peuvent être sauvegardés et consultés ultérieurement, permettant une flexibilité d'analyse à l'utilisateur.

Dans sa forme actuelle cependant, le logiciel OCP présente quelques lacunes quant à l'analyse des perturbations de type transitoire. Ces dernières peuvent être corrigées, moyennant certains développements.

Par exemple, seulement deux causes possibles à un tel type de perturbation ont été exposées, soit la foudre et l'enclenchement d'une banque de condensateurs. Ceci puisque ce sont ces dernières qui surviennent principalement dans le réseau électrique analysé. Il existe cependant plusieurs autres causes [24] telles que le déclenchement d'une banque de condensateurs, la mise sous tension et hors tension d'une charge inductive, une mauvaise connexion électrique sur un point de raccordement ou encore l'action de commutation de variateurs, pour ne nommer que celles-ci. Toutes ces causes de perturbations pourraient être instaurées dans l'application logicielle, ce qui renforcerait grandement la précision des résultats. Malheureusement, il est parfois difficile de différencier les conditions causant une transitoire et une analyse plus poussée sur le sujet devra être effectuée afin de rendre le processus viable et complètement autonome. Cette étude n'a pas été réalisée dans le cadre de ce mémoire et de futurs travaux pourraient porter sur le sujet.

Chapitre 4 - Résultats

4.1. Tests sur des données synthétiques

Afin de vérifier l'exactitude et la véracité des résultats émis par l'analyse logicielle effectuée à l'aide des algorithmes implémentés au chapitre précédent, des essais ont d'abord été conduits sur des ondes perturbées synthétiquement. Celles-ci ont été créées à l'aide du logiciel MATLAB et d'un script personnalisé permettant de faire varier les différents paramètres du signal.

Ces paramètres comprennent la fréquence, l'amplitude, la phase initiale et le facteur d'amortissement pour chaque composante fréquentielle. Les différentes banques de données représentaient donc l'addition d'une onde fondamentale, de plusieurs harmoniques ainsi que d'un bruit ayant un rapport signal sur bruit précis, en respect à l'équation 1.1.

Une fois ces valeurs synthétisées, elles ont été transposées dans un fichier Excel possédant une mise en page précise, ceci puisque le logiciel OCP requiert un certain formatage des données afin de les identifier adéquatement. En effet, les cellules du fichier Excel doivent être organisées selon une disposition préétablie.

Dans un premier temps, la feuille qui contient les différentes valeurs du signal doit être nommée « Values_table », comme dans la figure 4-1.



Figure 4-1 - Création de données synthétiques ; Nom de la feuille Excel

Ensuite, un entête ayant l'allure de ce qui est exposé dans la figure 4-2 doit composer la première ligne de la feuille.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Time	V1	V2	V3	I1	I2	I3

Figure 4-2 - Création de données synthétiques ; Entête du fichier

Dans cet entête, la colonne *Time* correspond aux échantillons de temps, les colonnes *V1* à *V3* correspondent aux valeurs de tension pour chacune des phases et *I1* à *I3* font référence aux courants pour chaque phase.

Les différents échantillons sont donc disposés en colonne, sous l'entête correspondant. Lorsque les fichiers de type Excel analysés possèdent cette mise en page précise, le logiciel OCP est en mesure de traiter les différentes données à l'intérieur de ses algorithmes.

Avec ces nouvelles séries de données synthétisées, il est possible de lancer des analyses à l'aide de l'application. Le but premier de cette manœuvre est de vérifier si les conclusions des différents algorithmes implantés dans le logiciel OCP concordent avec ce qui est attendu. Un exemple d'analyse effectuée par l'application logicielle sur des données synthétiques est présenté, de manière à vérifier l'exactitude des résultats.

Définissons d'abord les différentes valeurs de paramètres constituant le signal qui est analysé. Ces dernières sont énumérées au tableau 4-1. Dans cet exemple, le rapport signal sur bruit est très élevé et l'apport du bruit est donc négligeable.

Tableau 4-1 - Valeurs de l'onde synthétique

Fréquence (Hz)	Harmonique	Amplitude (p.u.)	Amortissement
60	1	1	0
720	12	0.1	-0.0025
1260	21	0.05	-0.0025
1740	29	0.025	-0.0025

Un signal triphasé d'une longueur de quatre cycles est synthétisé dans l'environnement MATLAB à l'aide de ces caractéristiques. La fréquence d'échantillonnage utilisée pour la génération de ce signal est de 30720 Hz, soit 512 échantillons par cycle. Les données générées sont ensuite exportées dans un fichier Excel. Ce dernier est sélectionné pour analyse à l'intérieur même de l'application logicielle OCP. Le reste de cette section présente les résultats qui sont exposés dans le rapport final de l'analyse pour ce signal précis.

La figure 4-3 illustre le contenu du signal synthétique, tel qu'il a été extrait depuis le fichier Excel fourni. On y remarque que par souci de simplicité, les perturbations créées sont identiques sur les trois phases du signal. L'analyse étant tout de même effectuée sur chacune d'elles.

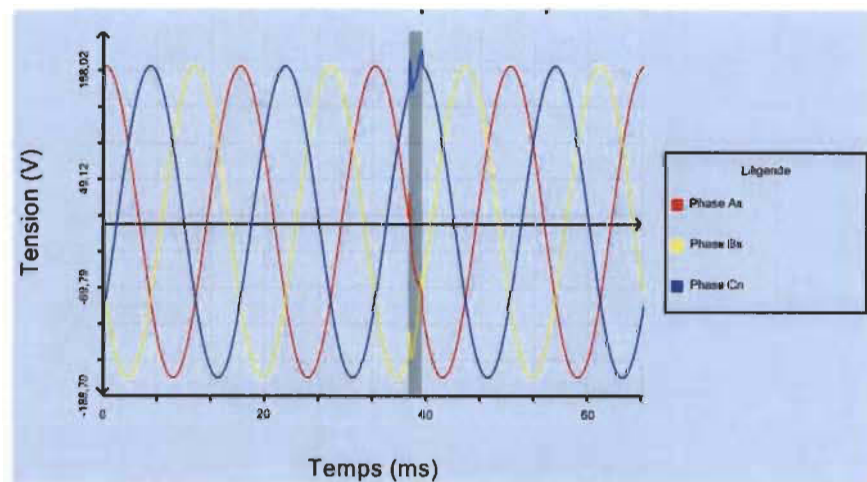


Figure 4-3 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre sinusoïdales - Données synthétiques

On y voit clairement une perturbation de type transitoire dans le troisième cycle. Puisque celle-ci se produit sur chaque phase aux mêmes indices de temps, mais pas aux mêmes points sur l'onde, on remarque une allure qui diffère d'une à l'autre.

La figure 4-4 démontre la courbe RMS qui a été calculée pour le signal. Tel qu'il fut exposé au chapitre précédent, on remarque qu'il est impossible, en suivant les recommandations émises, de détecter une perturbation à l'aide du principe de segmentation sur cette courbe. Si une segmentation était conduite sur cette forme d'onde, il en sortirait comme résultat qu'aucune perturbation n'est présente dans le signal. Or, il est clair que cette affirmation est fausse. C'est pourquoi le reste de l'analyse doit être effectué à partir de l'onde sinusoïdale, si cette dernière est disponible.

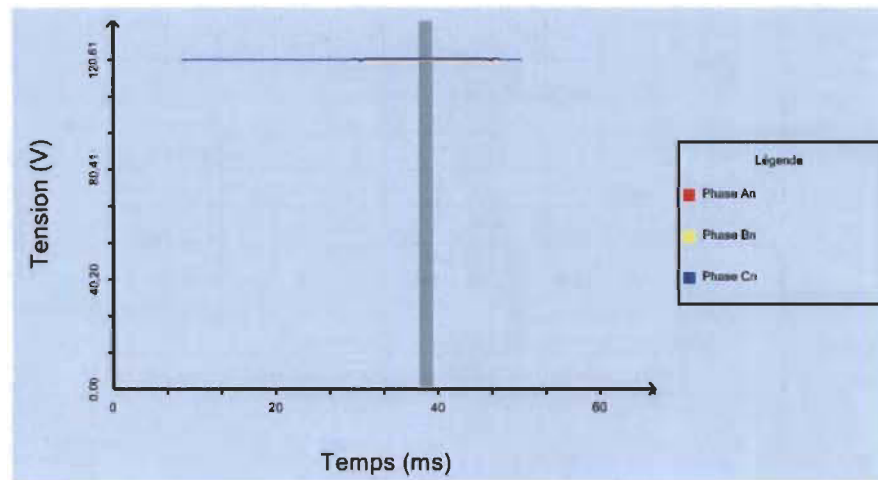


Figure 4-4 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre RMS - Données synthétiques

Tel qu'expliqué au chapitre précédent, la prochaine étape de l'algorithme correspond à détecter et à isoler le cycle transitoire dans le signal, à partir de l'onde sinusoïdale. La figure 4-5 présente le résultat de l'algorithme face aux données présentées pour cette étape.

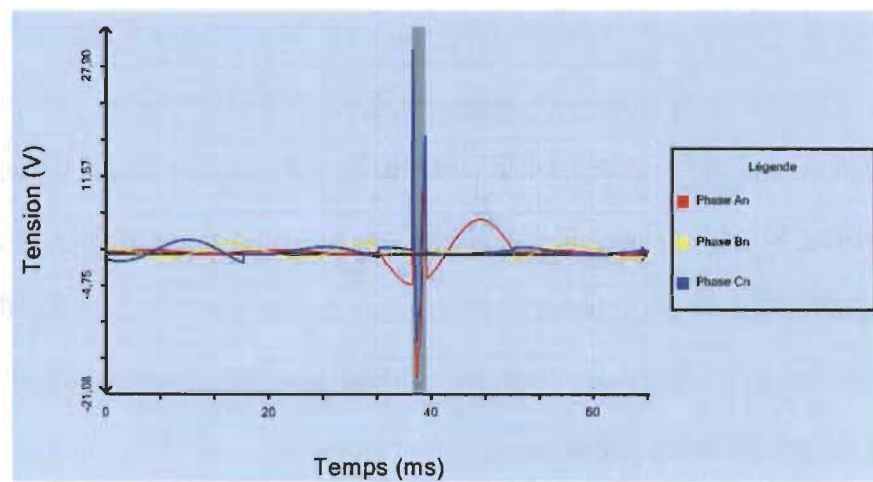


Figure 4-5 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre résiduelles - Données synthétiques

À partir de cette figure, on remarque facilement que les cycles synthétiques qui ont été créés afin d'être soustraits aux cycles de l'onde perturbée, tel qu'il a été décrit dans la section portant sur l'isolation du signal transitoire, ne sont pas totalement en phase. Cette conclusion vient du fait que l'onde résiduelle oscille légèrement autour de l'axe des abscisses, alors qu'on pourrait s'attendre à ce que la nature synthétique du signal source fasse en sorte qu'elle soit complètement nulle dans les cycles non perturbés. Puisque l'onde a été échantillonnée avec une fréquence de 30720 Hz, il est possible que les différents passages par zéro aient été mal estimés. Il faut cependant noter que compte tenu de l'échelle du graphique, les résultats paraissent pires qu'ils ne le sont, puisque la variation maximale observée pour les phases dans les cycles non perturbés est d'environ 2 %. Néanmoins, il est évident que le troisième cycle est celui qui est atteint par une perturbation.

Suite à la génération de ces courbes, le troisième cycle est isolé du signal résiduel et l'analyse des fréquences avec ESPRIT est effectuée. Les différentes composantes fréquentielles sont extraites, de même que la cause, l'origine et tous les paramètres énumérés dans la section correspondant à la génération des rapports. La figure 4-6 présente les différentes informations extraites lors de l'analyse. On peut en effet constater que les conclusions concernant le type ainsi que le sous-type de perturbation sont justes. Évidemment, puisque ce sont des données synthétiques, il est normal que la cause et l'origine ne soient pas identifiées. Le tableau renseigne également sur les valeurs de phase à l'initiation et au recouvrement. Finalement, on peut constater en vérifiant la figure 4-5 une zone ombragée représentant l'espace de temps cerné par les temps d'initiation et de recouvrement. La zone couverte représente bien les résultats attendus.

Information	Valeur
Nombre de segments d'événement	2
Nombre de segments de transition	1
Type de la perturbation	Transitoire de tension
Sous-type de la perturbation	Oscillatoire
Cause de la perturbation	Inconnue
Origine de la perturbation	Inconnue
Temps d'initiation (temps Initial relatif au point de déclenchement)	0,037486 Secondes
Temps de recouvrement (relatif au point de déclenchement)	0,039114 Secondes
Durée	0,001628 Secondes
Point sur l'onde à l'initiation de la perturbation	269,173 Degrés
Point sur l'onde au recouvrement de la perturbation	304,329 Degrés

Figure 4-6 - Tableau regroupant les informations de la perturbation - Données synthétiques

Une caractéristique importante concernant les rapports d'analyse est qu'ils fournissent une panoplie d'informations en lien avec les fréquences qui ont pu être extraites de l'onde perturbée. Ces informations sont traduites sous forme de tableaux et de graphiques.

Dans un premier temps, les fréquences trouvées ainsi que leurs paramètres respectifs sont répertoriées à l'intérieur d'un tableau, tel qu'illustré à la figure 4-7.

Phases	Harmoniques	Fréquences (Hz)	Amplitude (p.u.)
Va	9 17 29	540 1020 1740	0,11 0,11 0,03
Vb	11 21 29	660 1260 1740	0,10 0,05 0,02
Vc	11 21 29	660 1260 1740	0,10 0,05 0,02

Figure 4-7 - Tableau regroupant les fréquences trouvées - Données synthétiques

En comparant les valeurs contenues dans ce tableau avec celles du tableau 4-1, on remarque bien que les fréquences trouvées ne correspondent pas tout à fait. En effet, les

résultats de la phase Va semblent être légèrement mal estimés, comparativement aux phases Vb et Vc qui correspondent presque parfaitement. Encore une fois, tout part du fait que l'onde résiduelle est légèrement décalée, ce qui vient complètement fausser les résultats pour la phase Va en particulier.

La distribution des fréquences trouvées pour chacune des phases permet de facilement identifier les bandes récurrentes. Les figures 4-8, 4-9 et 4-10 font état du contenu fréquentiel détecté pour chacune des phases.

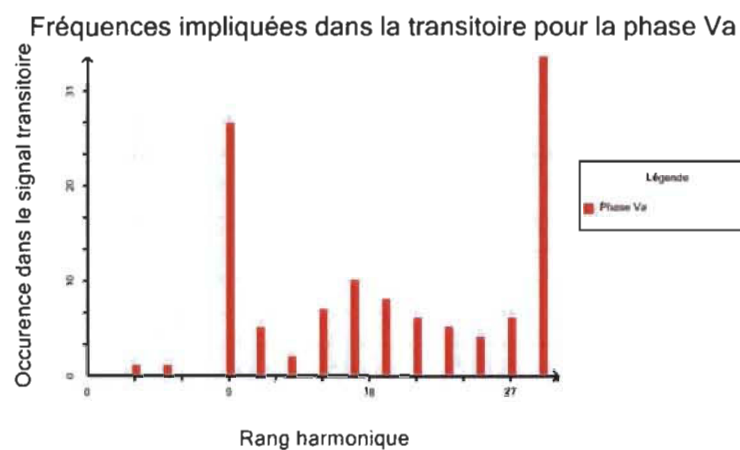


Figure 4-8 - Fréquences de la phase Va - Données synthétiques

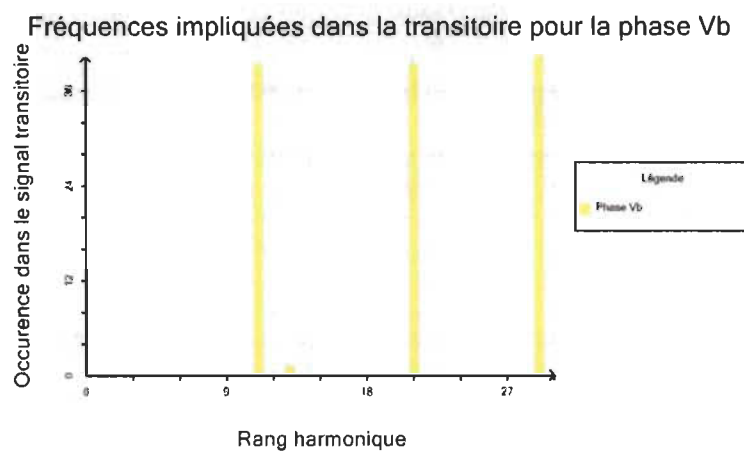


Figure 4-9 - Fréquences de la phase Vb - Données synthétiques

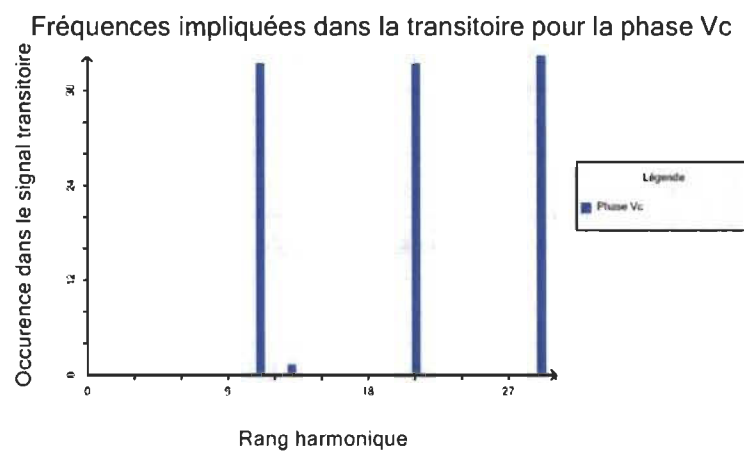


Figure 4-10 - Fréquences de la phase Vc - Données synthétiques

À la lumière de ces observations, on remarque une forte corrélation entre les données initiales et les résultats identifiés pour les phases Vb et Vc.

Bien que ces premiers résultats ne soient pas absolument parfaits, on conclut que l'algorithme fonctionne, mais que quelques modifications peuvent être apportées, principalement dans l'algorithme permettant de créer les cycles synthétiques servant à la soustraction de l'onde initiale. Évidemment, seulement un exemple de résultats d'analyse a été exposé, mais des conclusions semblables ont pu être tirées lorsque plusieurs autres formes d'ondes ont été introduites dans l'application.

4.2. Tests sur des données réelles

Puisque les algorithmes d'analyse semblent donner des résultats viables lorsque des données synthétiques sont fournies, de nouveaux tests sont effectués. Cette fois, des données recueillies directement sur le réseau électrique par l'entremise de différents appareils de mesure sont utilisées à des fins de validation.

Contrairement aux données synthétiques, les composantes du signal réel ne sont pas connues avant l'analyse. On ne peut donc que se fier aux résultats proposés par l'application logicielle, d'où l'importance d'obtenir des conclusions viables avec les données de référence.

À la différence des données synthétiques cependant, quelques caractéristiques supplémentaires devraient être proposées. Par exemple, la cause, l'origine, le lieu de l'enregistrement ainsi que le nom de l'appareil de mesure sont des paramètres qui n'ont pas pu être extraits lors de l'analyse de signaux synthétiques générés à l'aide du logiciel MATLAB, mais qui devraient être déterminés lors de l'utilisation de données réelles. C'est ce que l'exemple qui suit démontre.

La figure 4-11 présente les informations extraites directement du signal par l'algorithme de détection de l'onde, en tout début d'analyse.

Informations sur le signal	Valeur	
Nombre de phases	3	
Type de signal	Sinusoïdal	
Tension de référence LN (RMS)	132790	Volts
Tension de référence LL (RMS)	230000	Volts
Fréquence	60	Hertz
Nombre d'échantillons	1792	Échantillons
Taux d'échantillonnage	15360	Échantillons/seconde
Échantillons par cycle	256	Échantillons/cycle
Nombre de cycles	7	Cycles

Figure 4-11 - Informations sur le signal - Données réelles

On y retrouve les différentes valeurs de tension, de fréquence fondamentale ainsi que les informations relatives à l'échantillonnage du signal. Le taux d'échantillonnage de cette distribution est relativement bas et les effets que celui-ci occasionne pourront être observés et discutés.

Tout comme pour l'exemple précédent, les différents signaux récupérés dans le fichier analysé sont affichés. Les courbes sinusoïdales de tension sont visibles à la figure 4-12, alors que la courbe RMS est dessinée à la figure 4-13.

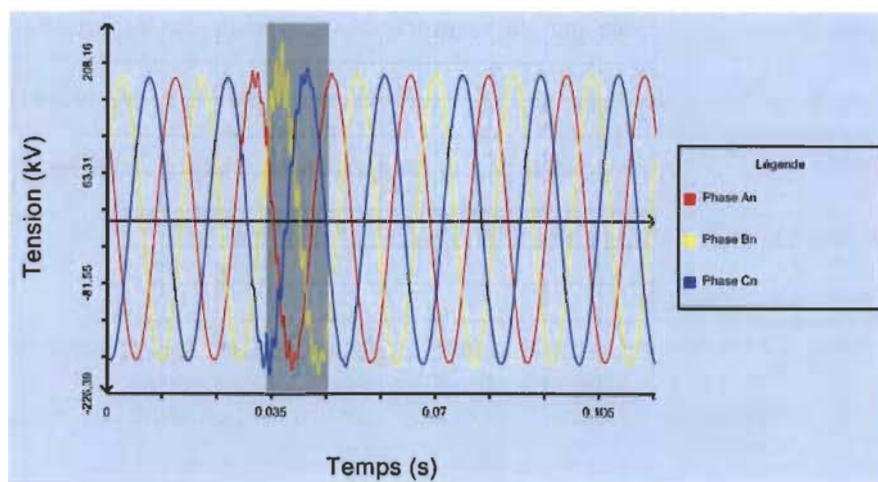


Figure 4-12 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre sinusoïdales - Données réelles

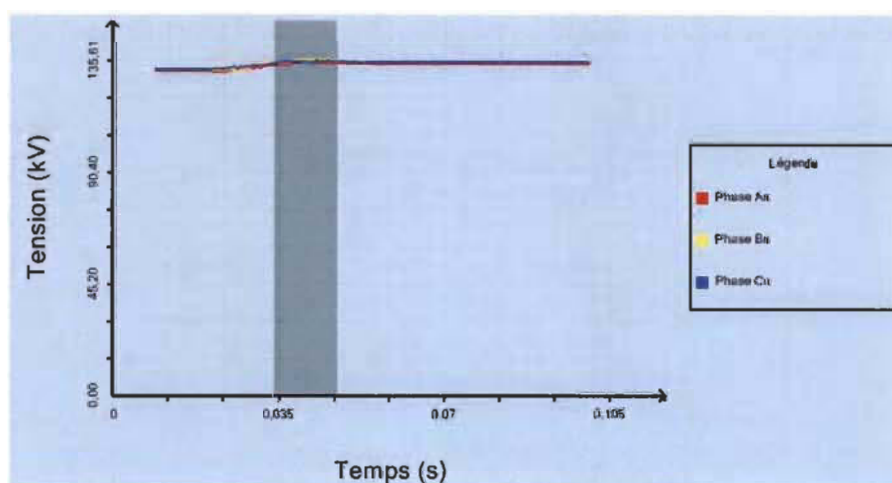


Figure 4-13 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre RMS - Données réelles

Encore une fois, on remarque une très faible variation de l'onde RMS dans l'entièreté du spectre temporel de la figure 4-13. Ceci vient une fois de plus renforcer l'importance d'avoir accès à l'onde sinusoïdale lors de l'analyse de perturbations possiblement transitoires.

L'onde résiduelle calculée par l'algorithme d'isolation de cycle perturbé est affichée dans la figure 4-14. On y voit une légère variation autour de l'axe des abscisses dans les cycles qui ne sont à priori pas perturbés et une forte oscillation dans les cycles où la transitoire a lieu. De plus, l'allure amortie de l'onde est observable.

De prime abord, on peut estimer le nombre d'harmoniques contenues dans ce signal à environ deux. Les résultats proposés ci-dessous pourront permettre de confirmer cette hypothèse.

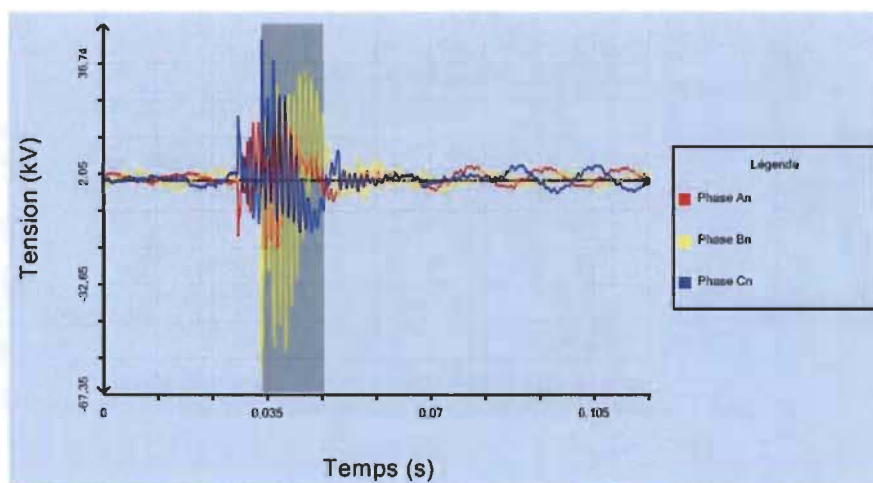


Figure 4-14 - Courbes de tensions triphasées phase-neutre résiduelles - Données réelles

Avant d'afficher les résultats de l'analyse fréquentielle, le tableau de la figure 4-15 est joint au rapport. On y retrouve plusieurs informations qui semblent être viables. Par exemple, la perturbation est de type transitoire et de sous-type oscillatoire, tel qu'il est facilement

observable dans la figure 4-14. De plus la cause déterminée s'apparente à l'enclenchement d'une banque de condensateurs située en amont de l'appareil de mesure, sur le réseau de distribution. Afin de confirmer cette conclusion, une analyse de la puissance du signal, du facteur de puissance et du comportement des différentes courbes à l'initialisation de la transitoire a été conduite. Malheureusement, aucun tableau récapitulatif de ces différentes conditions n'est affiché.

Information	Valeur	
Nombre de segments d'événement	2	
Nombre de segments de transition	1	
Type de la perturbation	Transitoire de tension	
Sous-type de la perturbation	Oscillatoire	
Cause de la perturbation	Enclenchement d'une batterie de condensateurs	
Origine de la perturbation	Réseau de distribution ou de transport	
Temps d'initiation (temps initial relatif au point de déclenchement)	0,033339	Secondes
Temps de recouvrement (relatif au point de déclenchement)	0,046558	Secondes
Durée	0,013218	Secondes
Point sur l'onde à l'initiation de la perturbation	238,194	Degrés
Point sur l'onde au recouvrement de la perturbation	163,93	Degrés

Figure 4-15 - Tableau regroupant les informations de la perturbation - Données réelles

Au point de vue fréquentiel, les différents résultats de l'analyse sont présentés dans le tableau de la figure 4-16, ainsi que par les graphiques illustrés aux figures 4-17 à 4-19.

Phases	Harmoniques	Fréquences (Hz)	Amplitude (p.u.)
Va	15	900	0,07
Vb	13	780	0,21
Vc	13 25 27	780 1500 1620	0,23 0,05 0,05

Figure 4-16 - Tableau regroupant les fréquences trouvées - Données réelles

On remarque une récurrence de la treizième harmonique dans les phases Vb et Vc, toutes deux avec une amplitude initiale similaire. La phase Va contient, quant à elle, une harmonique de quinzième rang, mais sa faible amplitude laisse présager que l'estimation est légèrement biaisée.

En observant les figures suivantes, on remarque la distribution des principales harmoniques détectées dans le signal. Bien qu'il y ait une légère discordance entre chaque phase on peut conclure, selon les données contenues dans le tableau présenté précédemment, que les fréquences principalement en jeu se trouvent autour de la treizième harmonique. Ceci vient renforcer l'hypothèse concernant la cause de la perturbation, puisqu'il a été mentionné au chapitre portant sur les différents types de transitoires que l'enclenchement d'une banque de condensateurs provoque généralement des fréquences oscillant entre 300 Hz et 900 Hz.

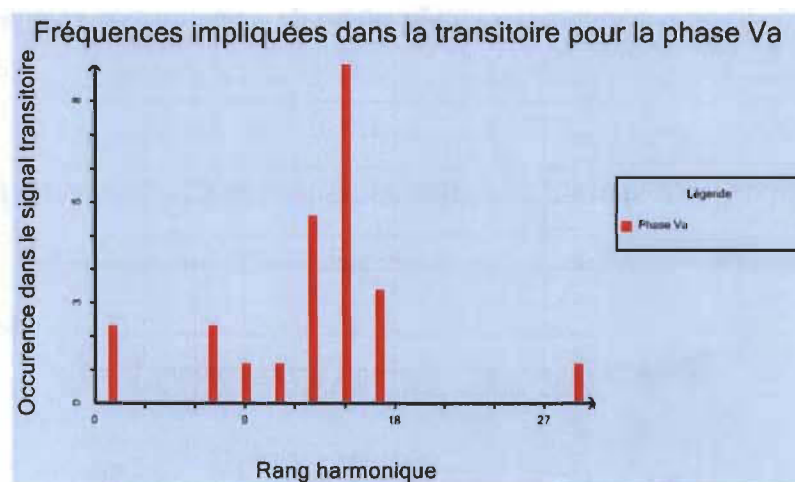


Figure 4-17 - Fréquences de la phase Va - Données réelles

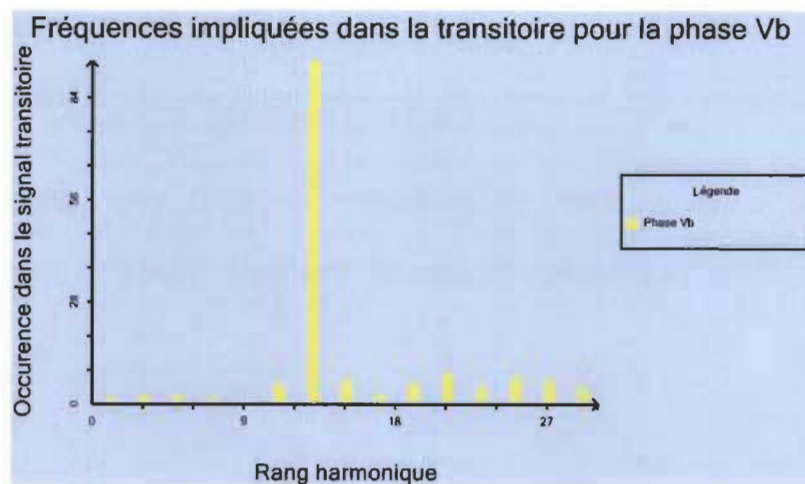


Figure 4-18 - Fréquences de la phase Vb - Données réelles

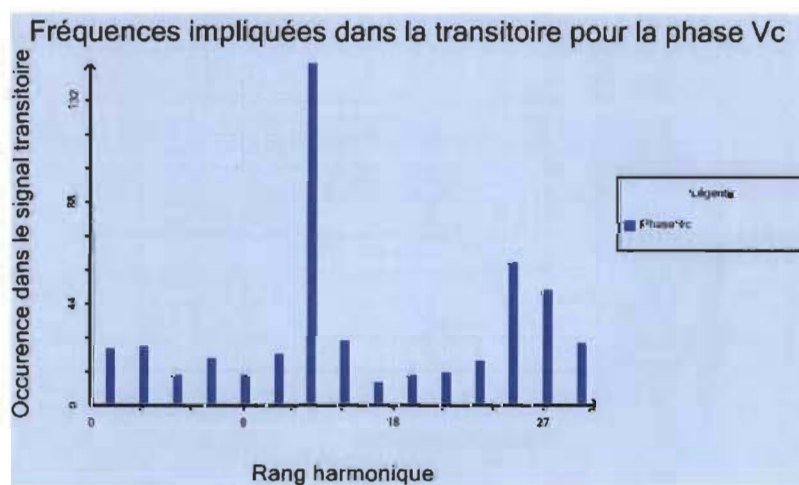


Figure 4-19 - Fréquences de la phase Vc - Données réelles

Afin de démontrer les capacités réelles du logiciel à ce jour, une analyse a été réalisée sur plusieurs formes d'ondes provenant d'un même instrument de mesure. Les tableaux qui suivent exposent les différents résultats extraits. L'analyse a été conduite sur six différents

ensembles de données. Dans le but d'alléger le contenu, seulement les informations concernant les fréquences trouvées, ainsi que les causes et origines sont affichées.

Suite à l'analyse des formes d'ondes fournies au logiciel, les graphiques représentant les différentes fréquences extraites ainsi que leurs amplitudes respectives pour chaque phase sont affichés.

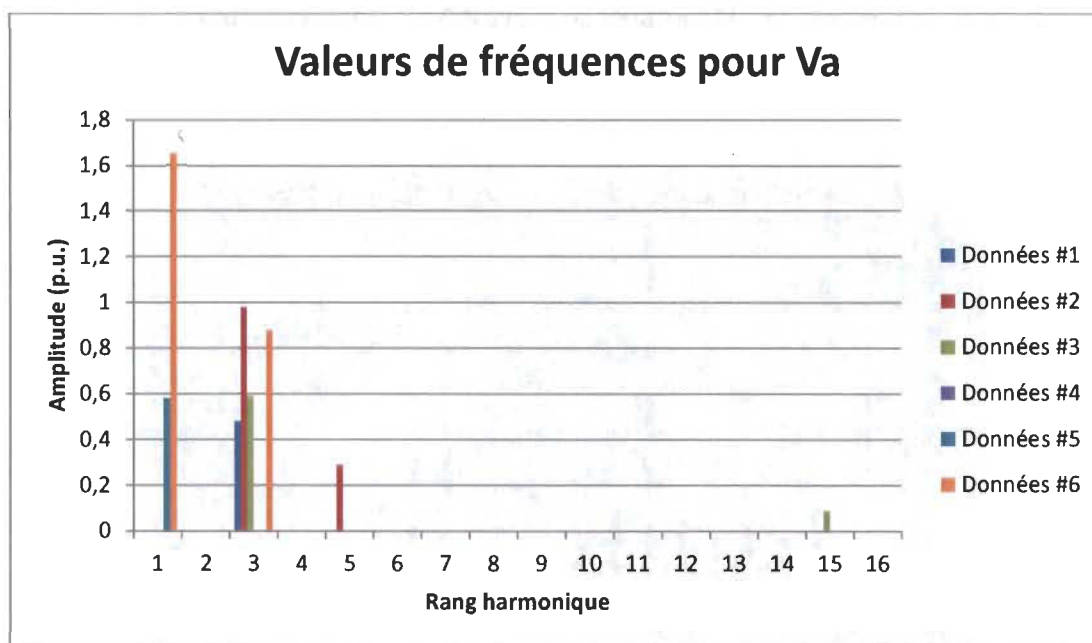


Figure 4-20 - Fréquences Va (analyse multiple)

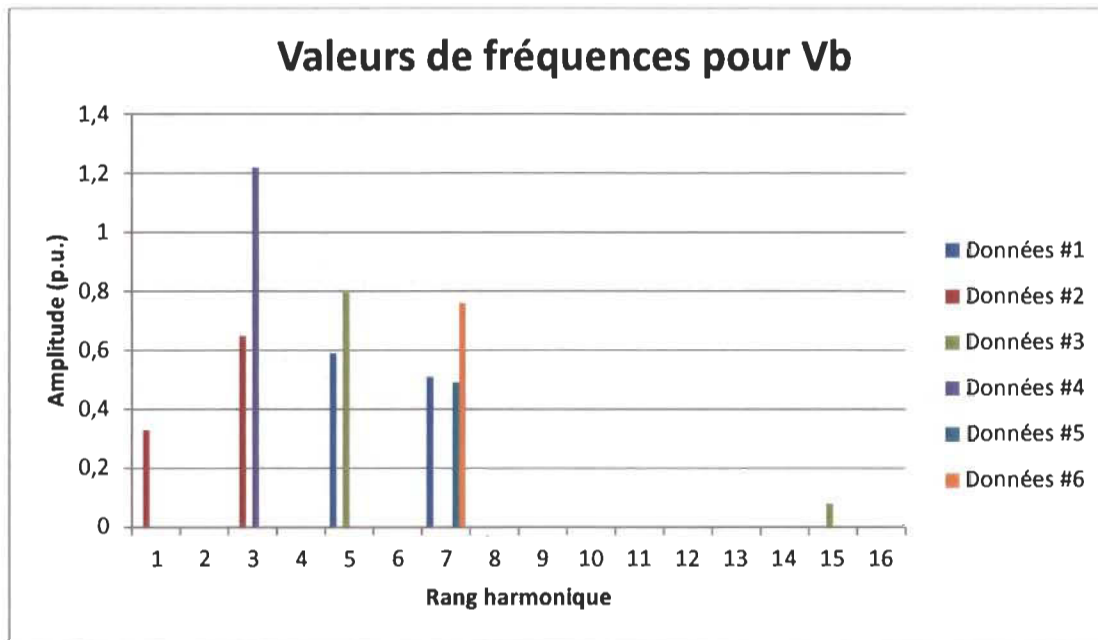


Figure 4-21 - Fréquences Vb (analyse multiple)

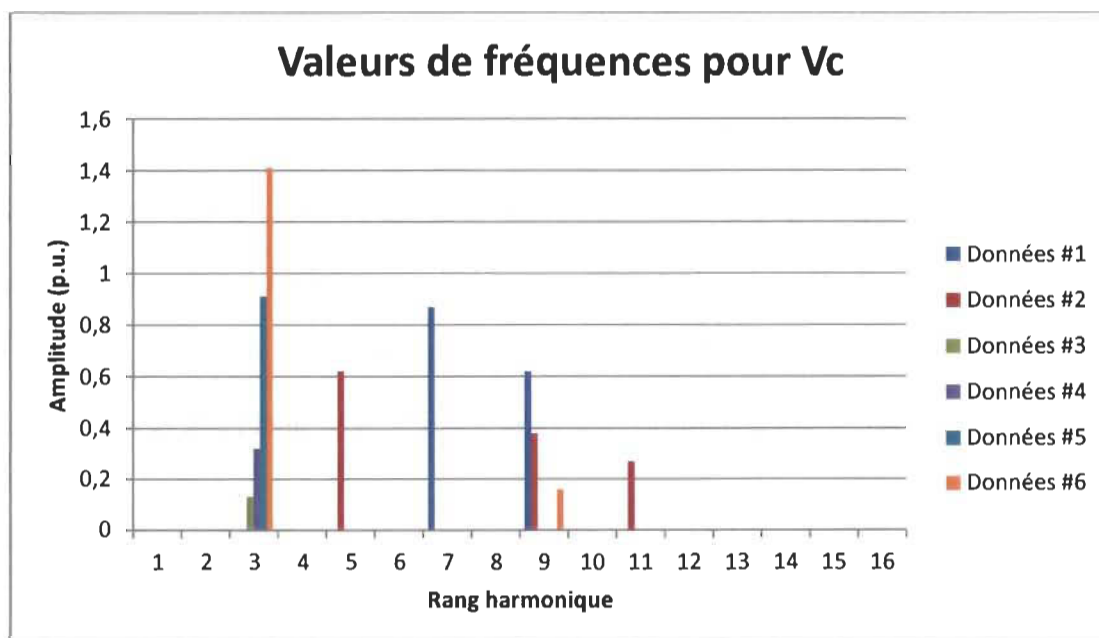


Figure 4-22 - Fréquences Vc (analyse multiple)

Tableau 4-2 - Causes associées aux perturbations détectées

Cause	Nombre d'occurrences
Enclenchement d'une batterie de condensateurs	6
Déclenchement d'une batterie de condensateurs	0
Foudre	0
Inconnue	0

Tableau 4-3 - Origines associées aux perturbations détectées

Origine	Nombre d'occurrences
Amont	6
Aval	0
Inconnue	0

Les résultats les plus importants afin de quantifier la performance de l'algorithme se trouvent aux figures 4-21 à 4-23, ainsi que dans les tableaux 4-2 et 4-3. En effet, on remarque par l'analyse de ces figures que les fréquences tendent à être regroupées d'une analyse à l'autre. Ceci est normal, puisque toutes ces détections ont été échantillonnées par le même appareil de mesure.

D'autre part, on peut facilement déduire que les fréquences trouvées sont largement situées dans les 1^{ière}, 3^{ième}, 5^{ième} et 15^{ième} harmoniques pour la phase Va, alors que la phase Vb possède des harmoniques de rang 1, 3, 5, 7 et 15. Sur la phase Vc, on remarque des

harmoniques de rang 3, 5, 7, 9 et 11. Il est toutefois possible de déterminer que la fréquence principale se situe autour de la troisième harmonique pour l'ensemble des phases.

La disparité entre les différentes valeurs de fréquences trouvées peut être expliquée par la présence de signal résiduel lors de la soustraction d'un signal parfait à chacun des cycles. Ceci pourrait aussi expliquer pourquoi certaines phases présentent toujours des harmoniques de premier rang. Celles-ci auraient dû être complètement amorties lors de la précédente étape, mais en fonction des points de passages par zéro utilisés, il est possible que ce ne soit pas complètement le cas. Ce point sera abordé dans la discussion.

On peut se permettre de douter de la véracité de ces résultats, puisqu'il paraîtrait normal de trouver une composante de troisième rang harmonique dans le réseau électrique. Par contre, on remarque aussi que la 15^{ième} harmonique est présente dans deux des trois phases, ce qui pourrait apporter du poids à la cause suggérée par le logiciel.

De plus, en se fiant aux tableaux 4-2 et 4-3, on remarque que toutes les analyses ont mené à la même conclusion, c'est-à-dire que la perturbation était due à l'enclenchement d'une banque de condensateurs située en amont de l'appareil de mesure, ce qui peut expliquer par l'apparition d'une composante de 15^{ième} rang harmonique, puisque la fréquence reliée serait de l'ordre de 900 Hz. Bien sûr, cette affirmation pourrait être validée en utilisant des moyens simples, tels qu'ils seront discutés plus loin.

En effet, une discussion aura lieu quant aux moyens qui peuvent être entrepris afin d'apporter des conclusions plus solides aux analyses automatisées. Pour le moment toutefois, il est valable de supposer que les résultats fournis par l'algorithme sont valables.

4.3. Conclusion partielle

Afin de vérifier la validité des algorithmes développés, plusieurs essais ont été réalisés. Ils ont été effectués en utilisant des signaux créés de manière synthétique dans l'environnement de travail MATLAB, mais aussi à l'aide de signaux réels provenant de la base de données d'Hydro-Québec.

Il a été exposé dans la section portant sur les essais à l'aide de données synthétiques que l'utilisation des formes d'ondes proposées ne permettait d'extraire toutes les informations concernant la perturbation, puisqu'il ne s'agissait que d'une somme de sinusoides amorties et de bruit. Il était donc impossible de déterminer une cause et une origine à ces transitoires. Cependant, il serait possible et même souhaitable de répéter cette étape, en utilisant cette fois des données simulées par un outil de travail spécialisé. Ce logiciel, nommé *Electromagnetic Transients Program (EMTP)*, permet notamment d'étudier les effets de différentes manipulations, tels l'enclenchement de batteries de condensateurs, sur le réseau électrique [25]. Des formes d'ondes contenant les transitoires ainsi engendrées peuvent également être exportées.

Par l'entremise de ce logiciel, il serait possible de recréer des conditions semblables à celles observées sur le réseau électrique québécois ou sur tout autre réseau, afin de créer des signaux perturbés pouvant servir de référence à la validation des algorithmes implantés dans le logiciel OCP. De la même manière que ce qui a été réalisé dans le cadre de ce mémoire, il serait possible de facilement identifier les failles dans les algorithmes, puisque les résultats attendus seraient connus avant même de lancer l'analyse. L'atout de cette méthode est que

tous les résultats pourraient être vérifiés, assurant ainsi une meilleure validation des principes instaurés.

Néanmoins, les essais conduits sur des signaux réels ont permis de mettre en lumière le bon fonctionnement des algorithmes d'analyse, puisque dans la majorité des cas analysés, les valeurs de fréquences détectées d'une phase à l'autre se situaient toutes dans des plages semblables. De plus, les essais réalisés sur plusieurs distributions de données provenant d'un même instrument de mesure démontraient tous une certaine corrélation dans leurs résultats. Ce phénomène est normal, puisqu'un instrument de mesure spécifique est généralement soumis à des perturbations qui se ressemblent.

À la lumière de tous ces essais, une nouvelle avenue pourrait être proposée afin d'améliorer la précision des causes suggérées. Il s'agit en fait d'intégrer une nouvelle base de données à l'application. En effet, plusieurs autres bases de données sont bâties au fur et à mesure que des événements se produisent sur le réseau électrique. Par exemple, une de ces banques regroupe toutes les manœuvres effectuées par un opérateur, qu'il soit humain ou non, sur chacune des lignes du réseau. Cette base de données, appelée «*Manœuvres et alarmes* » pourrait venir en aide lors de la détection de la cause et de l'origine par l'outil de classification des perturbations. Ceci puisque le logiciel n'a aucun moyen de déterminer la cause réelle de la perturbation, sinon qu'en comparant les signaux extraits avec des conditions spécifiques comme la variation de la tension ou de la puissance. Or, comme il a été exposé, il est parfois difficile de prioriser une condition sur une autre et il est possible que la validité des résultats soit mitigée.

En jumelant cette nouvelle base de données au logiciel et en considérant que l'heure et la date de l'enregistrement sont disponibles pour chaque perturbation présente dans la première base de données, il pourrait être possible de renforcer les résultats par une simple comparaison. Par exemple, si une perturbation est détectée et qu'une analyse révèle qu'il s'agit de l'enclenchement d'une banque de condensateurs ou de la mise sous tension d'une ligne, il pourrait être souhaitable de vérifier dans la base de données « *Manœuvres et alarmes* » si une manœuvre remplissant le même critère a été complétée dans ce même créneau de temps.

Dans le cas de l'affirmative, la viabilité du résultat de l'analyse est augmentée et dans le cas contraire, une réévaluation des paramètres utilisateurs ou une seconde analyse pourrait être nécessaire.

Dans l'ensemble toutefois, il a été démontré que les algorithmes d'analyse de perturbations transitoires présentaient des résultats similaires lorsque testés sur des données synthétiques et sur des données réelles. On conclut donc que les différents algorithmes implémentés dans l'application logicielle sont viables.

Chapitre 5 - Travaux futurs et conclusion

La problématique à laquelle ce document se voulait de répondre concernait l'automatisation de la détection et de l'analyse de perturbations venant affecter la qualité de l'onde délivrée par le producteur d'électricité, dans le cas présent Hydro-Québec.

Afin d'atteindre cet objectif, une brève description des instruments de mesure utilisés dans la récolte d'informations et une explication du type de perturbations principalement visé par ce document ont d'abord été rédigées. La méthode d'analyse du signal jusqu'à ce jour privilégiée a ensuite été exposée et ses limitations dans le cadre de l'atteinte de l'objectif actuel ont été mises en lumière. Il a d'ailleurs été démontré qu'une nouvelle méthode de détection est nécessaire et celle-ci a fait l'objet d'une explication détaillée. Une fois les bases bien établies, une description approfondie des différents concepts qui englobent les perturbations transitoires a été présentée.

De plus, les dernières avancées effectuées dans le domaine de l'automatisation des réseaux électriques intelligents ont été démontrées et ce, par l'entremise d'un logiciel d'analyse de la qualité de l'onde développé par Hydro-Québec. Les modifications qui ont été apportées au logiciel portent sur l'ajout des différents algorithmes développés ou modifiés dans le cadre de ce mémoire. Ces algorithmes permettent, entre autres, de détecter et d'isoler un signal perturbé ayant l'allure d'une somme de sinusoides amorties et d'en recueillir les principales caractéristiques permettant de les classer. Il a d'ailleurs été mentionné qu'afin d'améliorer les résultats de ces algorithmes, il pourrait être envisageable de jumeler une

nouvelle base de données qui permettrait de valider les résultats préliminaires émis par les différentes analyses. En effet, cette base de données qui regroupe toutes les manœuvres effectuées sur le réseau électrique permettrait de valider la cause et l'origine des différentes transitoires occasionnées à des endroits stratégiques du réseau.

De plus, le travail effectué dans ce mémoire peut être bonifié. Il serait souhaitable d'ajouter plusieurs causes manquantes dans l'algorithme décisionnel de l'application logicielle. En effet, seulement deux causes ont été prises en compte dans le présent document, mais il en existe cependant quelques autres. Malheureusement, celles-ci n'ont pas pu être ajoutées, puisqu'il était difficile d'obtenir des données les représentant clairement.

Afin de pallier au manque de données réelles, il serait possible de vérifier le comportement des différents algorithmes à l'aide de données créées synthétiquement, mais cette fois à l'aide d'un logiciel spécialisé, tel EMTP. La fiabilité des résultats de l'analyse en serait grandement accrue.

Ensuite, la direction entreprise afin de détecter les perturbations transitoires repose sur une analyse de la forme d'onde isolée. Cette dernière peut être biaisée tel qu'il a été démontré dans la section concernée. Il serait intéressant d'explorer d'autres avenues, par exemple en utilisant un réseau de neurones. En entraînant l'algorithme avec des formes d'ondes préalablement identifiées comme étant des perturbations transitoires, il serait peut-être possible de mettre en œuvre une détection plus robuste, qui repose sur le signal en entier, plutôt que sur le signal isolé seulement. Évidemment, ce principe n'est applicable qu'à la

détection de perturbations et ne permet pas d'améliorer la caractérisation fréquentielle de celles-ci, puisque les composantes du signal diffèrent énormément d'une analyse à l'autre.

Finalement, les résultats obtenus à l'aide des algorithmes implémentés dans ce mémoire semblent concluants et tendent à répondre à la problématique initiale en offrant une meilleure automatisation de l'analyse de la qualité de l'onde, mais aussi en permettant de traiter rapidement et efficacement un plus grand nombre de perturbations.

Bibliographie

- [1] Vanya Ignatova, *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique*, Thèse de doctorat en génie électrique, Sofia, Université Joseph Fourier, 2006, 169 p.
- [2] Hydro-Québec , *Étude: Qualité de l'onde*, Rapport R-3725-2010, 2010, 58 p.
- [3] Angelo Baghini, *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons, 2008, 644 p.
- [4] Hydro-Québec, *Caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension d'Hydro-Québec*, Rapport 30012-01-02, 2001, 39 p.
- [5] [En ligne]
<http://www.schneider-electric.us/en/product/M8650A0C0H6C7B1A/m8650-power-monitor-128-mb---60-hz---9s,---ethernet/> Consulté le 6 juin 2017
- [6] [En ligne]
<http://www.powerqualityworld.com/2011/05/impulsive-transients-power-system.html>
 Consulté le 6 juin 2017
- [7] Richard Roy, Thomas Kailath, "ESPRIT- Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques", *IEEE Transactions On Acoustics, Speech And Signal Processing*, Vol.37, No. 7, p. 984-995, Juillet 1989
- [8] Emannouil Styvaktakis, *Automating Power Quality Analysis*, Department of Electric Power Engineering and Department of Signals and Systems, Chalmers University of Technology, pp. 185-197, 2002
- [9] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", *IEEE std 1159-2009*, 2009, 91 p.
- [10] Math H.J. Bollen, Irene Y.H. Gu, "Signal Processing Of Power Quality Disturbances", John Wiley & Sons, 2006, p. 243-253, 635-676
- [11] Roberto Moreno, Nancy Visairo, Ciro Nunez, "A Novel Algorithm for Voltage Transient Detection and Isolation for Power Quality Monitoring", *Electric Power Systems Research*, p. 110-117, Mai 2014
- [12] Math H.J. Bollen, Irene Y.H. Gu, "Estimating InterHarmonics by Using Sliding-Window ESPRIT", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 23, No. 1, 11 p., Janvier 2008

- [13] [En ligne]
<http://fr.wikihow.com/calculer-des-donn%C3%A9es-aberrantes> Consulté le 6 juin 2017
- [14] [En ligne]
<http://www.math-info.univ-paris5.fr/~cabanal/Annales/Stat-Processus/Poly/Poly-0/node22.html> Consulté le 6 juin 2017
- [15] [En ligne]
https://fr.wikipedia.org/wiki/Donn%C3%A9e_aberrante Consulté le 6 juin 2017
- [16] Marc-Antoine Durand, Mamadou L. Doumbia, Francisc Zavoda, "Power system transient analysis based on rotational invariance technique", *CIGRÉ Canada Conference*, 10 p., 2016
- [17] Math H.J. Bollen, Emmanouil Styvaktakis, Irene Y.H. Gu, "Categorization and Analysis of Power Transients", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 20, No. 3, pp. 2298-2306, Juillet 2005
- [18] Xiufeng Song, Zafer Sahinoglu, Jianlin Guo, "Transient Disturbance Detection For Power Systems With A General Likelihood Ratio Test", *IEEE International Conference On Acoustics, Speech And Signal Processing*, pp. 2839-2843, May 2013
- [19] Grzegorz Szwoch, Maciej Kulesza, Andrzej Czyzewski, "Transient Detection for Speech Coding Applications", *IJCNSN International Journal Of Computer Science and Network Security*, Vol. 6, No. 12, December 2006
- [20] Irene Y.H. Gu, Math H.J. Bollen, "Estimating Interharmonics by Using Sliding-Window ESPRIT", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 23, No. 1, pp. 13-23, January 2008
- [21] Alvaro Furlani Bastos, Surya Santoso, Levent Biyikli, "Identifying Switched Capacitor Relative Locations and Energizing Operations", *Proceedings of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July 2016
- [22] [En ligne]
<https://fr.wikipedia.org/wiki/LaTeX> Consulté le 6 juin 2017
- [23] Mathieu Mercier, *User manual of Sag Classification Tool Software*, Rapport IREQ, 57 p., 2012
- [24] [En ligne]
<http://barktech.com/wp-content/uploads/2012/09/Causes-and-Effects-of-Transient-Voltages.pdf> Consulté le 6 juin 2017

- [25] Willis Long, David Cotcher, Dan Riui et *al.*, "EMTP – A Powerful Tool For Analysing Power System Transients", *IEEE Computer Applications in Power*, 6 p., 1990

Annexe A- Power System Transients Analysis Based On Rotational Invariance Technique

Marc-Antoine Durand, Mamadou Lamine Doumbia, Francisc Zavoda

Université du Québec à Trois-Rivières, Institut de Recherche d'Hydro-Québec

Québec, Canada

Power system transients analysis based on rotational invariance technique

SUMMARY

The algorithm under scrutiny in this article is the Estimation of Signal Parameters using Rotational Invariance Technique (ESPRIT). In literature, this algorithm shows good results when estimating parameters of a known signal waveform. Its use is generally “offline”. In fact, some initially unknown parameters, namely the number of harmonics, the starting and the ending points of the analysed transient signal must be set during the analysis, forcing the user to guide the algorithm on the right path. This makes the algorithm semi-automated. To counter this problem, this paper proposes the implementation of two additional techniques. They will allow the automation of the whole process, facilitating the algorithm implementation in a fully automated classification tool.

ESPRIT is an algorithm used in various fields of research, which contributes to the detection of main parameters of a signal based on the sum of damped-sinusoids by using the signal subspace-based approach. This method separates the signal and the noise subspaces from the eigenvectors of the signal. Resulting output parameters include: frequencies, amplitudes, damping factors and initial phases of the signal components. Once the parameters are estimated, the signal may be reconstructed and compared to the original distorted transient signal.

This paper presents an overview of ESPRIT and provides information about the additional algorithms that have been developed to support the automation of the analysis process. Ultimately, these manipulations allow the recovery of the parameters that compose the signal, without any human intervention. Once the combination of algorithms has proved to be reliable, it is implemented into the automated power-quality analysis tool developed by the Research Institute of Hydro-Quebec (IREQ).

In this article, two types of 3-phase waveform are used to validate the proposed algorithms. Synthetic data is created with MATLAB and used to set the different reference thresholds values. Then, real data acquired from the network is analysed to demonstrate the effectiveness of the approach in real-life situations.

KEYWORDS

Sag, Transients, Disturbances Classification, ESPRIT, Smart Grid, Power Quality

1. INTRODUCTION

Many Intelligent Electronic Devices (IED) have been connected to the grid, along the feeders, in substations and at some customer point of delivery (POD) or point of common coupling (PCC). These devices allow monitoring voltage and current disturbances occurring on the power lines. The acquired data is stored in different databases and is available for post-analysis by engineers and experts. Unfortunately, the quantity of data is so huge that it makes the analysis task almost impossible for the people in charge. This is one of the reasons why a division of Hydro-Quebec Distribution (HQD), the Large Customers department, asked for a software analysis tool capable to perform complex analysis of large number of recorded disturbances, in a fast and accurate way. It is in response to this demand that the Sag Classification Tool (SCT) has been developed. As indicated by its name, this software does the analysis of files recorded in databases, detecting and classifying exclusively one type of disturbance, namely sags or swells. These disturbances occurring on distribution networks are by far those that most affect the customers.

However, not only sags and swells can be observed on the grid, but also some other types of disturbances. One of them is transients. Among power-quality (PQ) disturbances, power system transients might be the most harmful to devices with electronic components. Such disturbance, which is characterized by a change in the steady-state, last for a very short period of time (subcycle). Transients are generally caused by lightning strikes or by switching operations of capacitor banks. Nowadays, more and more electronic equipment require quality supply voltage to properly operate. For this reason, the quality of the power delivered to customers is a major issue and demand for constant improvement. This is another reason

why the Large Customers department asked for further development of the SCT software. The idea behind this request was to be able to detect, quantify and classify this rather important type of grid disturbance, using an easy-to-use algorithm. The software would then evolve to become the Sag and Transients Classification Tool (STCT).

In this article, the work and results related to the development of the aforementioned algorithm will be discussed, as well as issues and workarounds. Also, future work and software implementation will be exposed.

2. THEORY

The voltage and current waveforms are expected to be a pure sinusoid of given fundamental frequency, namely 50 or 60 Hz. However, transients occurring on the grid affect this waveform by adding harmonic and sub-harmonic frequencies. In opposition to sags and swells, which have a much narrower frequency spectrum, transients may have frequency components going from a few hundred to many thousand hertz.

Although transients may have a wide variety of causes, the most common ones are lightning and switching actions on a bank of capacitors. These disturbances are characterized by short rising time, relatively short damping delay and are described as the superposition of one or more damped sinusoids to the fundamental frequency. Depending on the resistive component of the network in which they propagate, transients have variable damping time components, usually ranging from less than half a cycle to many cycles. They can be classified into two different categories: impulsive transients and oscillatory transients, both having different characteristics [1].

Many algorithms can be used to extract the frequency components of such waveforms [2], [5],[8], [9], however the Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (ESPRIT) algorithm suits peculiarly well to the presented data model. Although its implementation is not as straightforward as some other algorithms, the information it provides are worth it.

Transients usually take the following form, representing the model exposed earlier with additive noise $e(t_n)$:

$$x(t_n) = \sum_{i=1}^P A_i e^{-\alpha_i t_n} \cos(2\pi f_i t_n + \phi_i) + e(t_n) \quad (1)$$

Where P is the number of damped sinusoids and is assumed known.

3. ALGORITHMS

3.1. Overview

The frequency components, peak amplitude, duration, origin, type and cause are some of the parameters of interest. Although the peak amplitude, origin, type and cause are not in the scope of this paper, relevant information can be found in literature [2], [3]. The duration is not directly related to ESPRIT but will still be extracted, in order to provide estimation of parameters (see section 3.2) used with the main algorithm. The algorithms will first be tested out by applying synthetic waveforms with known parameters. This will ensure that the results reflect what is expected. Then, data acquired from one of Hydro-Quebec's databases will be

fed into the algorithms and the results will be exposed and discussed. Table 1 contains different components of the synthetic waveform.

Table 1. Synthetic waveform characteristics

Frequency (Hz)	Harmonic	Amplitude (p.u.)	Damping factor
60	1	1	0
720	12	0.1	-0.0025
1260	21	0.05	-0.0025
1740	29	0.025	-0.0025

For simplicity purposes, all three phases are affected by the same disturbance and the analysis will be performed only on phase A. However, it is obvious that the algorithms must be extended to all three phases of voltages and currents for further analysis. Figure 1 shows the resulting synthetic waveform affected by the transient waveform depicted in figure 2.

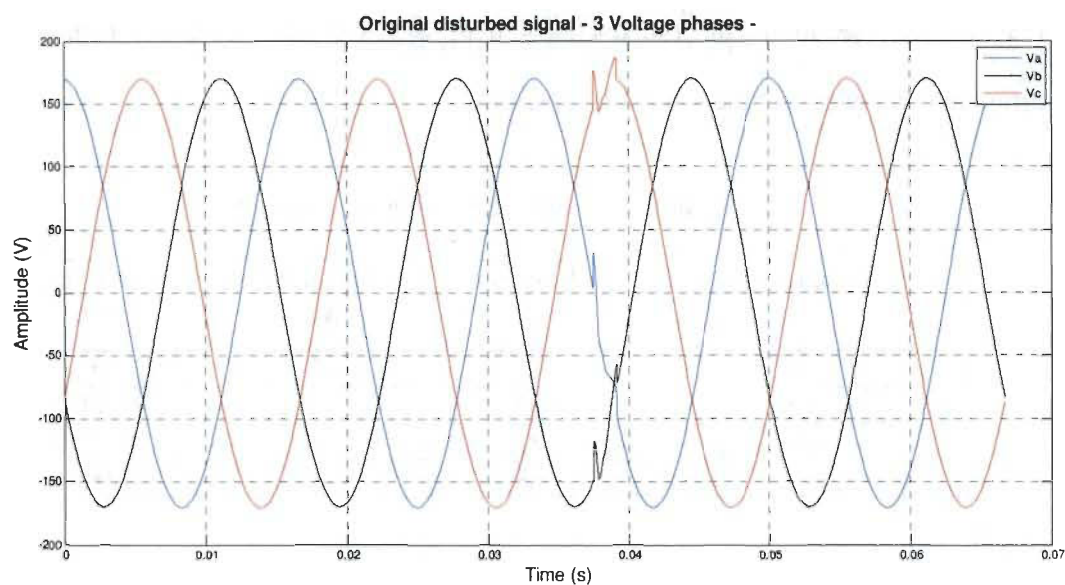


Figure 1. Synthetic distorted waveform

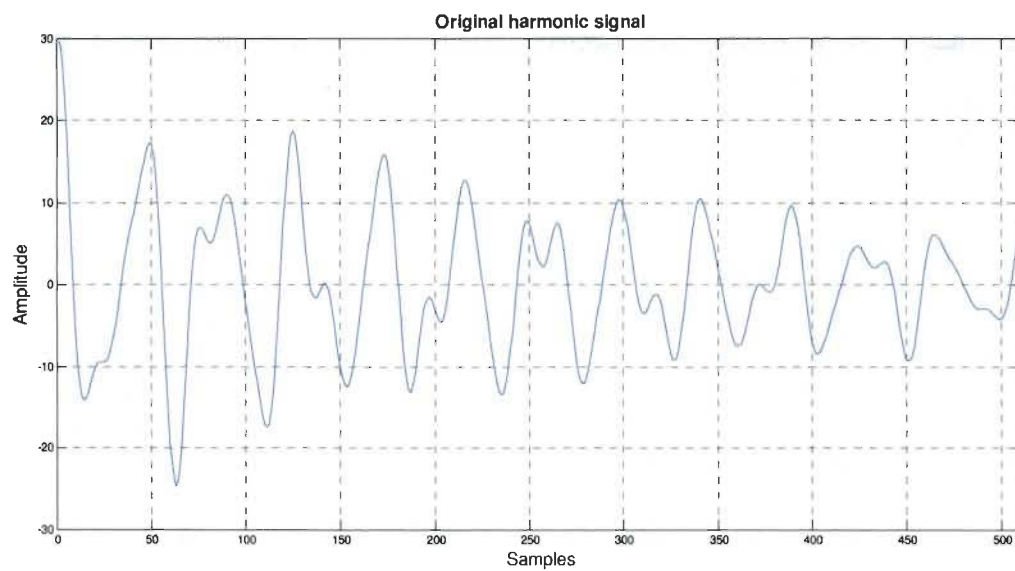


Figure 2. Synthetic transient waveform

3.2. Estimation of Signal Parameters using Rotational Invariance Technique (ESPRIT)

The ESPRIT algorithm decomposes the signal into a sum of damped sinusoids by using the signal subspace-based approach. Very detailed explanations of the algorithm development can be found in [4], [5], [6] and will not be exposed in this paper. However, we can consider the following hypothesis:

- The isolated portion of the signal containing the transient is composed of a sum of damped sinusoids;
- The number of harmonics P is assumed known;
- The starting and ending point of the transient are also assumed known.

Obviously, the second and third hypotheses are usually not known beforehand and would technically need human intervention. They also change from one analysis to another, preventing the possibility to store their values into default user settings. The following section will address this issue by providing solutions with the help of simple manipulations.

The following flowchart (see figure 3) exposes the suggested approach in order to recover the valuable parameters using ESPRIT.

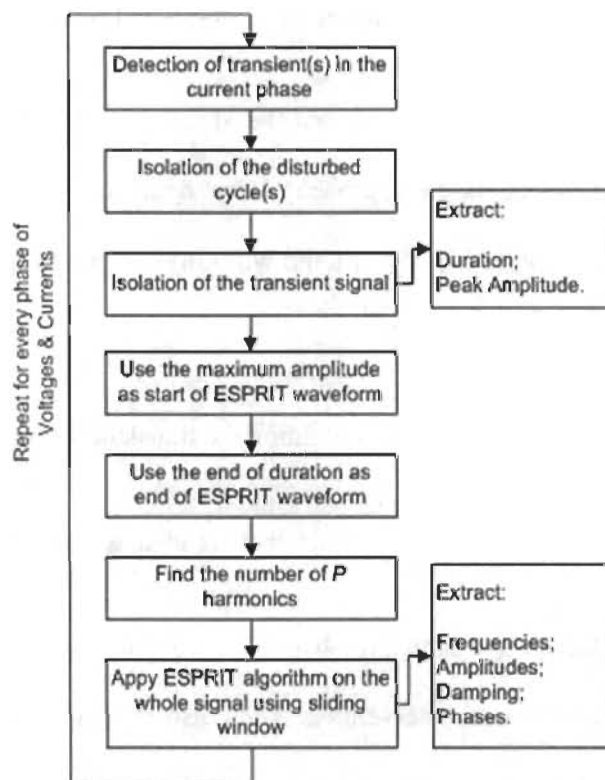


Figure 3. ESPRIT flowchart

As it is illustrated in the previous flowchart, the first step is to detect the presence of a transient. This can be done by using one of the methods described in [2], [7]. When this first condition is verified, the second step consists of isolating distorted cycles from the rest of the waveform. The separation methods are based on: applying a high-pass filter to remove the fundamental frequency, subtracting a perfect waveform to every cycle or comparing the cycles together to detect variations. Each of these methods have their pros and cons [2]. For sake of simplicity, the chosen method consists of subtracting one of the undistorted cycles preceding the disturbance from the distorted cycles, allowing the removal of all steady-state

frequencies. A drawback of this method is the sampling rate and the possible need for interpolation between samples. Depending on the type of data used and its sampling rate, the method of isolation might differ in order to get more accurate results. In case of a low sampling rate, the subtraction operation can produce an erroneous result (the resulting waveform is not 0V-DC waveform). However, waveforms used to validate the method were sampled at a high rate of 30720Hz.

For good results, ESPRIT algorithm needs to be fed with data that only represent damped sinusoids. This means that all data not included between the point of starting and of ending of the isolated waveform must not be considered. These points are defined as:

- Initiation point t_{start} ;
- Recovery point t_{end} ;

First, the parameter t_{start} corresponds to the time where the absolute value of the transient waveform reaches its peak [1].

Then, the parameter t_{end} is the time where the transient is completely damped. This assumption holds when dealing with synthetic waveforms, but is no longer acceptable with real data, since the waveform is never perfectly damped and a non-zero value can always be observed. As a different approach to set this parameter, the time corresponding to the end of the transient duration could be used as a reference point. To find this point, along with the duration of the transient, a simple method [2] is used and consists of comparing the absolute value of the transient to a user defined threshold. The transient starts when the value goes over the threshold for the first time and ends when it goes under the threshold for the last time. The threshold can be adjusted to increase the sensitivity of detection. The isolated

transient cycle for phase Va of a real data set as well as the threshold associated to the detection are visible in figure 4. The value of the threshold has been fixed to 0.15p.u. for this example.

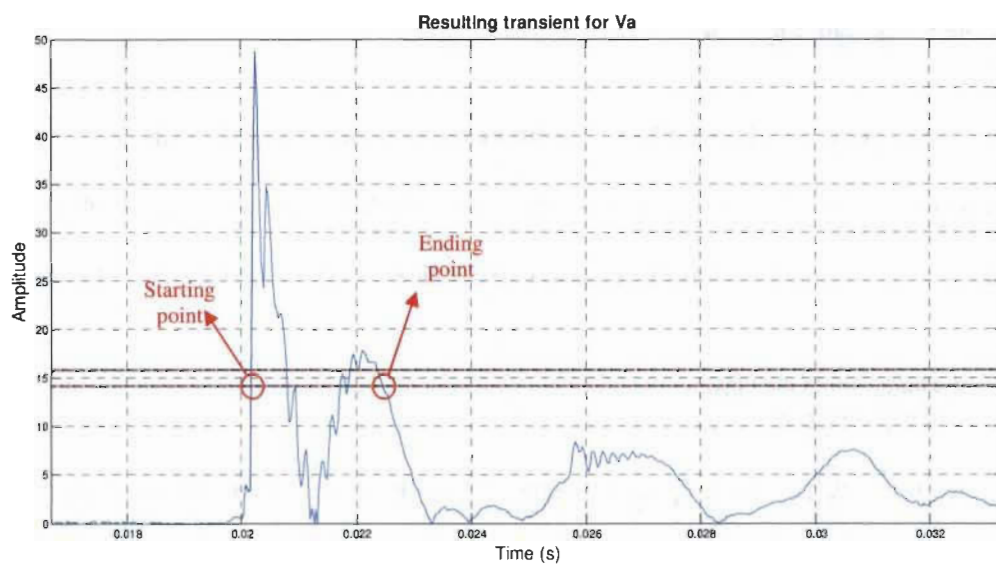


Figure 4. Duration points detection

The total duration corresponds to the difference between the ending and starting points and the value of the ending point is attributed to the parameter t_{end} .

Let the parameter P be the number of harmonics components in the transient signal. This parameter is unknown by the user and has to be computed to obtain the best results. In [1] for example, the authors propose to fix the value of P as high as necessary to meet a minimal difference criterion between the original and the reconstructed waveforms. Although this method works quite well, it involves a lot of computation resources since the algorithm has to

be performed many times in order to get the optimal value. The solution proposed is to evaluate the optimal value of P as a function of the signal's eigenvalues, with simple manipulations.

Considering that ESPRIT is based on the eigenvalues decomposition of the data into subspaces, i.e. signal and noise subspaces [8] and that noise is usually much weaker than the signal itself, we can try to approach this eigenvalues separation problem by considering the variation between each eigenvalues. To do this, eigenvalues must first be sorted in descending order.

Generally, the first eigenvalues will have much higher values than the last ones and the distribution should take the form of a negative exponential curve.

The proposed approach to determine what pairs of eigenvalues are associated to the signal subspace relies on the ratio between each value and the maximum value (the first eigenvalue when sorted in descending order). Because each signal has different eigenvalues, ratios will differ between analyzes. Dividing eigenvalues by the maximum value will allow the standardization of ratios, as long as the characteristic decreasing exponential curve is satisfied. The computed ratios are then compared with a user adjustable threshold. The number of optimal pairs is determined by the even number of ratios higher than the threshold. This technique uses simple mathematic relations and works best when signal-to-noise ratio is high, because a clear separation between signal and noise subspaces can be observed. The figure 5 shows the general eigenvalues curve shape and the normalized ratios used for the detection of the parameter P . The evaluation of the synthetic data eigenvalues suggests setting

the ratio threshold at 0.0001. This value allows the optimal number of eigenvalues to be selected.

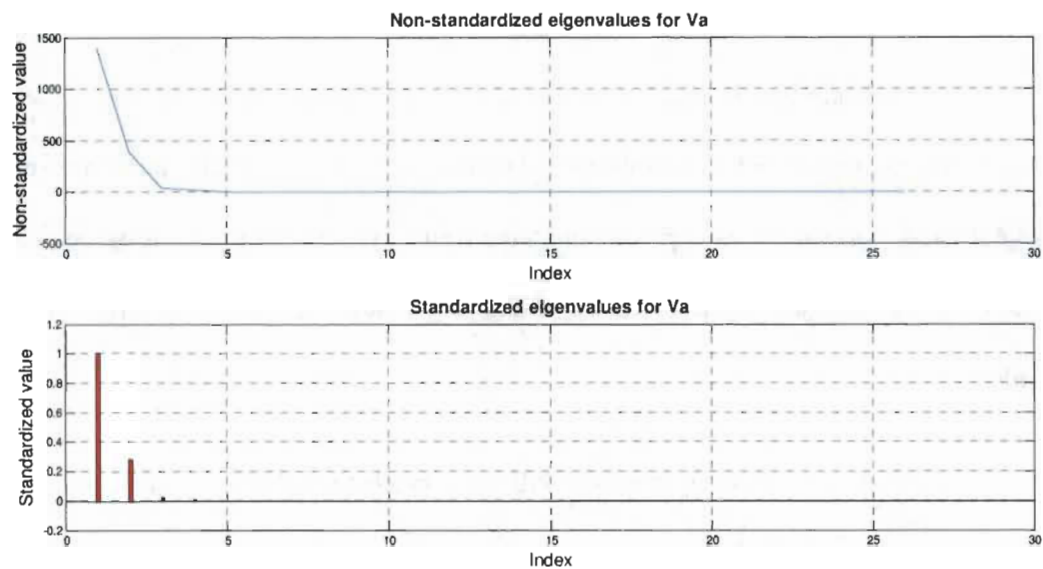


Figure 5. Eigenvalues characteristic curve (top), Standardized eigenvalues (bottom)

4. METHOD VALIDATION

4.1. Synthetic data

After determining the main parameters, the ESPRIT algorithm was tested in conjunction with a moving window on the extracted portion of the distorted cycle included between the starting and ending points (see figure 6). This allowed the estimation of frequencies to be made iteratively as the window moved to the end of the signal. Then, it was possible to see if there was a correlation between the iterations.

The algorithm has been tested and validated with the synthetic waveform exposed earlier. The relevant charts and information are given in figure 7.

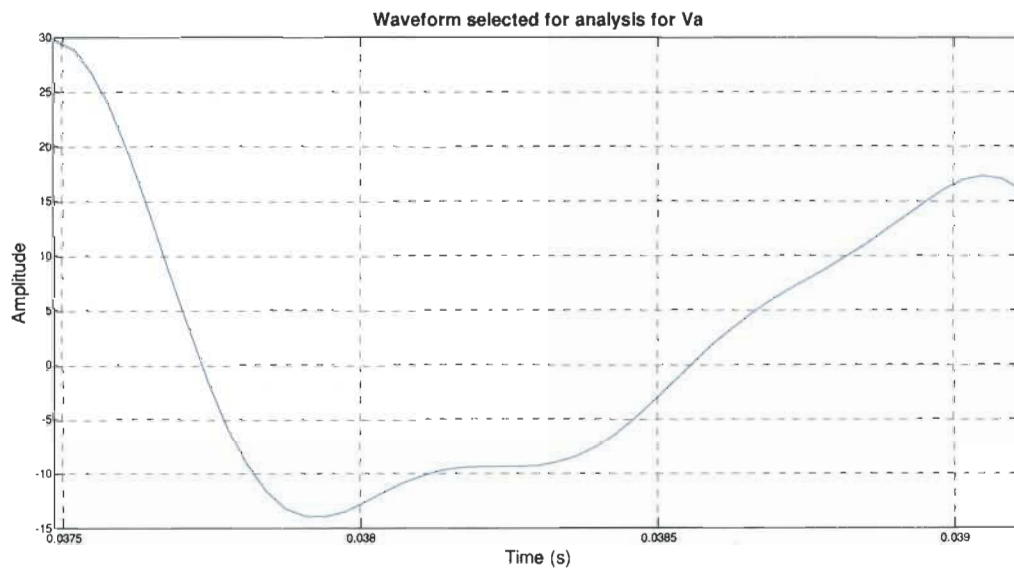


Figure 6. Isolated transient waveform for synthetic data set

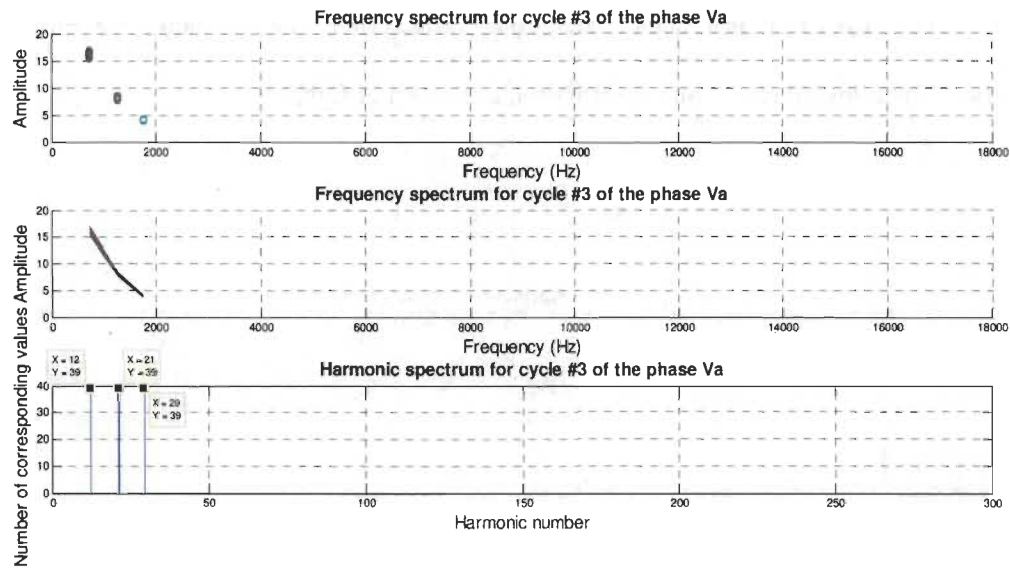


Figure 7. Iterative frequency spectrum for synthetic data set

The graph at the bottom of figure 7 shows the number of corresponding estimations for each harmonic bandwidth. It can be seen that the extracted harmonics fit the characteristics of the synthetic waveform depicted in table 1.

4.2. Real data

The same process has been repeated with a set of real data acquired from the network itself. The sampling rate is the same (30720Hz) as the one used to build the synthetic waveform. The second cycle presents a transient on each of the 3-phase voltage signal. A disturbance also can be noticed in the third cycle of phase Vb.

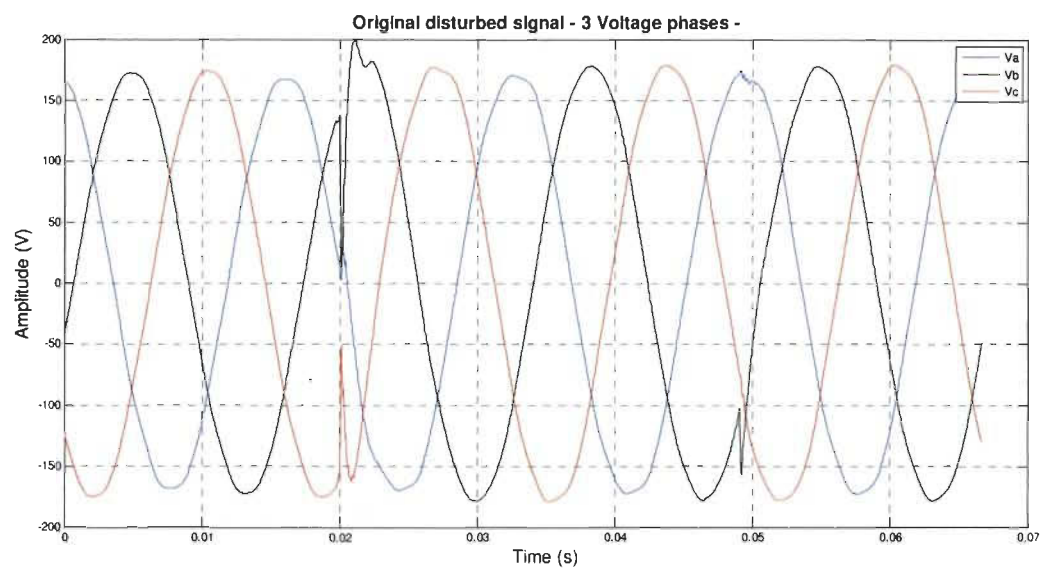


Figure 8. 3-phase voltages of real data set

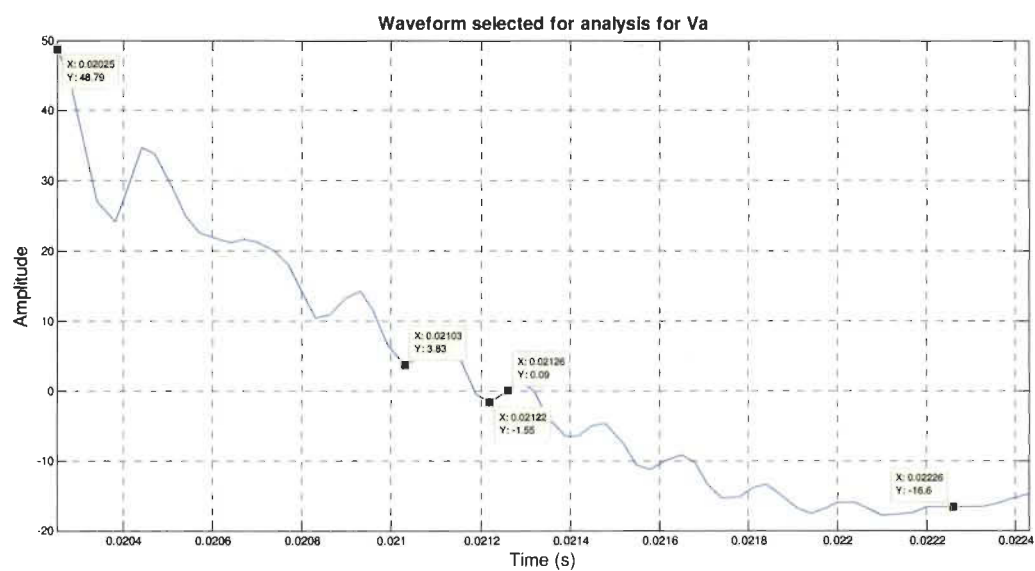


Figure 9. Isolated transient waveform for real data set

As shown in figure 10, the results for phase Va of the real data set are not as narrowed as the results for the synthetic waveform. However, a correlation can be observed between the different values. In fact, a gathering of points is easily identifiable around the 5th, 76th and 93rd harmonic bins.

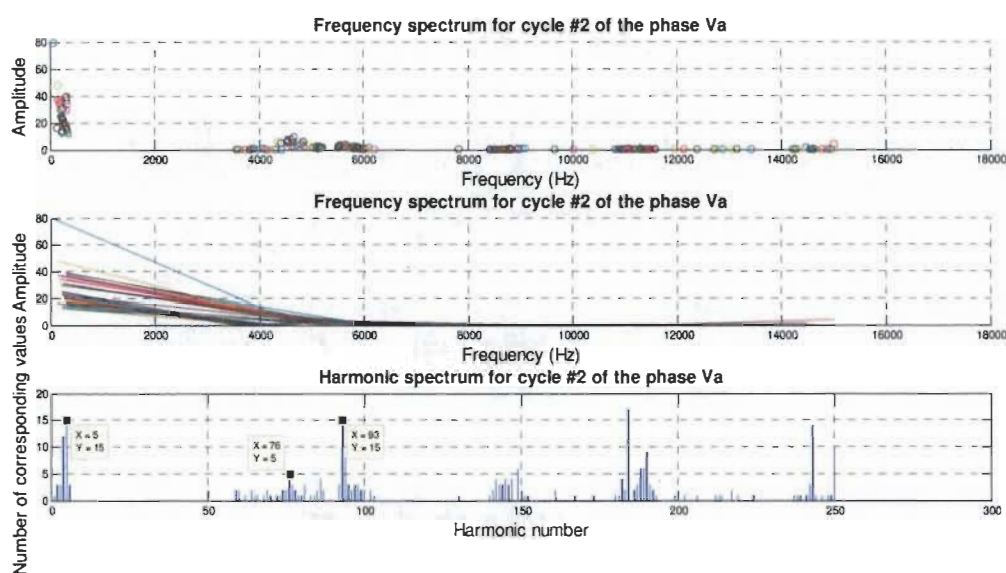


Figure 10. Iterative frequency spectrum for real data set

Looking at the initial extracted transient waveform (see figure 9), it is possible to approximate the component frequencies. In this data set, mainly two frequencies contribute to the transient. They can be approximated using the following formula:

$$frequency = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

Where $t_2 = t_1 + 16.6ms$

The higher frequency can be estimated with $t_1 = 0.02103s$ and $t_2 = 0.02122s$ and corresponds to approximately 5263Hz. The frequency on the graph is located at the 93rd harmonic bin, which corresponds to 5580Hz (60Hz). The result could have been more accurate if using an interpolation in the computation of the estimated time stamps.

Because the number of samples is limited in the extracted waveform, it is more complicated to evaluate the lower frequency, but still the graph shows that it should be located around the 5th harmonic bin.

The higher frequencies shown in the graph are questionable. They may be due to the number of eigenvalues considered in the computation being too high. If the subspaces were not correctly defined, signal subspace may have been corrupted with noise. The accuracy and uncertainty of the measurement chain (instrument transformer + IED) may also be a cause.

5.CONCLUSION

This paper presents recent developments made on the automated software tool used for sag and transient classification currently developed by the Research Institute of Hydro-Quebec, in order to assess a large amount of power quality data. The research was focused on transient detection and analysis. The ESPRIT algorithm was used to extract the desired information from transient waveforms. It has been shown how simple mathematic functions could be used to find the parameters required by ESPRIT. The algorithms, the implementation

issues and solutions as well as the preliminary results related to the quest of transient parameters are exposed. The work performed on ESPRIT algorithm uncovered some possible issues related to the sampling frequency of the assessed data, since a low sampling rate can lead to misdetection and inaccurate results. Precaution should be taken when choosing the hardware used for data acquisition. Attention should be paid to the sampling rate; higher sampling rate provides better results. Also, the synthetic waveform used to configure the different parameters has been created manually and its characteristics may not comply with the reality. In future works, these synthetic waveforms should be created with the help of specialized software. Also, multiple synthetic data sets should be used. This will ensure the viability of the different defined thresholds and provide better statistics. Finally, the algorithms have been developed in the MATLAB programming environment and future works will include their implementation in the STCT software. Also, the origin, the cause, the type and the peak value of the transients under analysis will be extracted for classification purposes.

6. BIBLIOGRAPHY

- [1] Math H.J. Bollen, Emmanouil Styvaktakis, Irene Y.H. Gu, "Categorization and Analysis of Power Transients", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 20, No. 3, pp. 2298-2306, July 2005
- [2] Math H.J. Bollen, Irene Y.H. Gu, "Signal Processing Of Power Quality Disturbances", John Wiley & Sons, 2006, pp. 243-253, 635-676

- [3] Alvaro Furlani Bastos, Surya Santoso, Levent Biyikli, "Identifying Switched Capacitor Relative Locations and Energizing Operations", *Proceedings of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July 2016
- [4] Irene Y.H. Gu, Math H.J. Bollen, "Estimating Interharmonics by Using Sliding-Window ESPRIT", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 23, No. 1, pp. 13-23, January 2008
- [5] Richard Roy, Thomas Kailath, "ESPRIT- Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques", *IEEE Transactions On Acoustics, Speech And Signal Processing*, Vol.37, No. 7, pp. 984-995, July 1989
- [6] Xiufeng Song, Zafer Sahinoglu, Jianlin Guo, "Transient Disturbance Detection For Power Systems With A General Likelihood Ratio Test", *IEEE International Conference On Acoustics, Speech And Signal Processing*, pp. 2839-2843, May 2013
- [7] Roberto Moreno, Nancy Visairo, Ciro Nunez, "A Novel Algorithm for Voltage Transient Detection and Isolation for Power Quality Monitoring", *Electric Power Systems Research*, pp. 110-117, May 2014
- [8] Dimitris G. Manolakis, Vinay K. Ingle, Stephen M. Kogon, "Statistical and Adaptive Signal Processing", Artech House, 2005, pp. 488-493
- [9] Emannouil Styvaktakis, "Automating Power Quality Analysis", *Department of Electric Power Engineering and Department of Signals and Systems*, Chalmers University of Technology, pp. 185-197, 2002