



Optimisation de la consommation électrique du terminal à conteneurs est au port de Casablanca

Ahmed El Hafidi

► To cite this version:

Ahmed El Hafidi. Optimisation de la consommation électrique du terminal à conteneurs est au port de Casablanca. Energie électrique. 2014. dumas-01695646

HAL Id: dumas-01695646

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01695646>

Submitted on 29 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

CENTRE DU MAROC

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

EN

SYSTEMES ELECTRIQUES

Par

Ahmed EL HAFIDI

**Optimisation de la consommation électrique du Terminal à Conteneurs
Est au Port de Casablanca**

Date soutenance : 03/06/2014

JURY:

PRESIDENT : G. ROSTAING

**MEMBRES : A. SAAD
A. SANDALI
A. BOULAJOUL**

Résumé

Face à une forte augmentation de la facture en énergie électrique ces dernières années, les économies d'énergie ne permettent pas seulement d'amortir rapidement le surcoût issu de l'investissement dans un appareillage électrique (compensation d'énergie réactive, dispositif de surveillance de la consommation d'électricité ou encore utilisation d'un moteur à haut rendement par exemple) mais aussi d'assurer la compétitivité de son entreprise.

La société d'opérations portuaires Marsa Maroc est soucieuse de réduire ses coûts d'exploitation pour améliorer sa compétitivité. Elle vise à perfectionner et rationaliser sa consommation d'énergie. C'est l'objectif de cette étude réalisée sur le réseau électrique alimentant le terminal à conteneurs Est du port de Casablanca.

L'accent a été mis sur les installations qui fonctionnent à l'électricité dans tous le processus de production pour identifier les pertes en non valeur, proposer des idées afin de réduire la consommation d'énergie électrique, et estimer le gain tout en évaluant l'investissement nécessaire.

Abstract

In front of a strong increase of the invoice in electrical energy these last years, energy savings allow not only to weaken quickly the additional cost stemming from the investment of an electric equipment (compensation of reactive energy, monitoring system of the consumption of electricity or the use of an engine with high yield for example) but also to insure the competitiveness of his (her) company.

The company of port operations Marsa Morocco is committed to reducing its operating costs to improve its competitiveness. It seeks to improve and streamline its energy consumption. It is the objective of this study realized on the electricity network feeding the container terminal of the port of Casablanca.

The focus was made on all process equipments in order to identify the losses, propose some ideas and get the saving behind it versus the investment required.

Avant-propos

Le présent rapport résume le travail que j'ai réalisé dans le cadre du mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en systèmes électriques, les enseignements sont dispensés par **CNAM (le Conservatoire Nationale des Arts et Métiers)**.

Ce mémoire, que j'ai souhaité réaliser au sein de l'entreprise où j'exerce mon activité professionnelle : **MARSA MAROC**, m'a permis de travailler sur un projet d'optimisation énergétique du réseau électrique du terminal à conteneurs Est qui est la plus grande plate-forme d'exploitation au Port de Casablanca.

Ce projet m'a donné l'occasion d'apprendre énormément tant en termes de connaissances théoriques (conception des réseaux électriques industriels, qualité de l'énergie électrique) et pratiques (facturations des consommations, audit énergétique, économie d'énergie) qu'en termes de développement personnel.

J'ai pu réaliser le diagnostic des équipements électriques et le bilan électrique des installations et quantifier les consommations inutiles et perdues. Ceci après un important travail de collecte des informations et données relatives à l'exploitation du réseau électrique (factures électriques, historiques des incidents).

Remerciement

Que l'on me permette, à travers ce mémoire d'adresser mes sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier mon encadrant, Monsieur **Abdallah SAAD** Directeur de **NORMINDUS** pour l'aide et les conseils qu'il m'a apporté au suivi de ce travail et pour le temps qu'il m'a consacré tout au long de cette période, sans oublier sa participation au cheminement de ce rapport.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique et les intervenants professionnels responsables de la formation **CNAM ENSEM** en **systèmes électriques (option : électrotechnique**. Merci notamment au responsable pédagogique Monsieur **Mohammed KHAFALLAH**.

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance à Monsieur **Youness DAMOU** Chef de division Engins de levage, Monsieur Aimad **BOULAJOUL** Chef de service Engins de levage et Monsieur **Redouane BERRADI** Chef de service réseaux électriques.

Enfin un merci particulier aux membres de ma petite famille qui ont dû être privés de moi certains soirs et fins de semaine, leurs sacrifices et leur support ont été pour moi une source de réconfort et d'encouragement.

Liste des Tableaux

TABLEAU 1: TRANSFORMATEURS HTA/BT AU TCE [1]	29
TABLEAU 2: CONDENSATEURS DE COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE [1]	29
TABLEAU 3: LES PORTIQUES A CONTENEURS IMPLANTES AU TCE	30
TABLEAU 4: BILAN DE PUISSANCE DU PORTIQUE	31
TABLEAU 5: MATERIELS D'ECLAIRAGE PUBLIC DU TCE [1]	32
TABLEAU 6: BATIMENTS DU TCE	33
TABLEAU 7: PUISSANCES SOUSCRITES DES POSTES ELECTRIQUES DU TCE	34
TABLEAU 8: TARIFS DE LA CONSOMMATION ELECTRIQUE	36
TABLEAU 9: CONSOMMATION ELECTRIQUE PAR TRANCHE HORAIRE	37
TABLEAU 10: CONSOMMATION ELECTRIQUE DES PORTIQUES A CONTENEURS	39
TABLEAU 11: PRODUCTION ET CONSOMMATION ELECTRIQUE DES PORTIQUES	40
TABLEAU 12: FACTEURS DE PUISSANCE ENREGISTRES EN 2011	42
TABLEAU 13: DETAILS DE LA FACTURE ELECTRIQUE DE 2011	44
TABLEAU 14: FACTEURS DE CHARGE DU TCE	46
TABLEAU 15: CONSOMMATIONS ELECTRIQUES DE 2011 EN TETE DE BOUCLE	57
TABLEAU 16: PUISSANCES APPELEES APRES COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE	59
TABLEAU 17: ALGORITHME DE CALCUL DE LA PUISSANCE SOUSCRITE OPTIMISEE	60
TABLEAU 18: REDEVANCE PUISSANCE SOUSCRITE EN COMPENSATION TOTALE DE L'ENERGIE REACTIVE	61
TABLEAU 19: SPECTRES DE COURANT HARMONIQUE EMIS PAR LES EQUIPEMENTS PERTURBATEURS	70
TABLEAU 20: ECOULEMENT DE PUISSANCE DANS LE RESEAU DE DISTRIBUTION	75
TABLEAU 21: TAUX DE DISTORSION INDIVIDUELLE ET GLOBALE DES TENSIONS	75
TABLEAU 22: TAUX DE DISTORSION INDIVIDUELLE ET GLOBALE DES COURANTS	75
TABLEAU 23: TAUX DE DISTORSION DES COURANTS DANS LES LIGNES DES PORTIQUES	75
TABLEAU 24: NIVEAUX DE COMPATIBILITE POUR LES TENSIONS HARMONIQUES (<i>NORME CEI 61000-2-2</i>)	76
TABLEAU 25: LIMITES DE DISTORSION DE COURANT POUR LES SYSTEMES DE DISTRIBUTION (120 V A 69 000 V)	76
TABLEAU 26: PARAMETRES DES FILTRES A INSTALLER AU NIVEAU DES BUS BT	77
TABLEAU 27: PARAMETRES DES FILTRES A INSTALLER SUR LES PORTIQUES	77
TABLEAU 28: POWER FLOW DU RESEAU DE DISTRIBUTION AU TCE APRES FILTRAGE	78
TABLEAU 29: TAUX DE DISTORSION INDIVIDUELLE ET GLOBALE DES TENSIONS APRES FILTRAGE	78
TABLEAU 30: TAUX DE DISTORSION INDIVIDUELLE ET GLOBALE DES COURANTS APRES FILTRAGE	79
TABLEAU 31: TAUX DE DISTORSION DES COURANTS DES PORTIQUES APRES FILTRAGE	79
TABLEAU 32: TEMPS DE DECHARGEMENT DE 1000 CONTENEURS EN FONCTION DU TEMPS DE CYCLE	92
TABLEAU 33: ECONOMIE ENVISAGEABLE GRACE AUX EQUIPEMENTS PERFORMANTS EN ECLAIRAGE	100

Liste des figures

FIGURE 1: PORTS D'IMPLANTATION DE MARSAMAROC.....	19
FIGURE 2: VUE AERIENNE DU TERMINAL TCE AU PORT DE CASABLANCA	20
FIGURE 3: PLAN DE MASSE DU TCE.....	26
FIGURE 4: SYNOPTIQUE DISTRIBUTION ELECTRIQUE AU TCE.....	27
FIGURE 5: SYNOPTIQUE DE LA BOUCLE ALIMENTANT LE TCE EN HTA.....	28
FIGURE 6: SYNOPTIQUE ELECTRIQUE DU PORTIQUE A CONTENEURS	30
FIGURE 7: TRANCHES HORAIRES DE TARIFICATION ELECTRIQUE.....	34
FIGURE 8: CONSOMMATIONS ELECTRIQUES AU TCE.....	37
FIGURE 9: PUISSANCES APPELEES ET PUISSANCES SOUSCRITES.....	38
FIGURE 10: REPARTITION DE LA CONSOMMATION DE L'ENERGIE ACTIVE	39
FIGURE 11: REPARTITION DE LA CONSOMMATION DE L'ENERGIE REACTIVE	40
FIGURE 12: CONSOMMATION GLOBALE EN FONCTION DU NOMBRE DE BOITES MANUTENTIONNEES.....	41
FIGURE 13: CONSOMMATION DES PORTIQUES EN FONCTION DU NOMBRE DE BOITES MANUTENTIONNEES.....	41
FIGURE 14: SPECTRE DES HARMONIQUES PRELEVEES SUR UN PORTIQUE	43
FIGURE 15: PRINCIPE DE MISE EN PLACE DU COMPTAGE EN TETE DE BOUCLE	56
FIGURE 16: SYNOPTIQUE DE MISE EN PLACE D'UN SYSTEME DE DELESTAGE GLOBALE AU TCE.....	62
FIGURE 17: INFLUENCE DE L'ENERGIE REACTIVE SUR LA PUISSANCE INSTALLEE	64
FIGURE 19: PRESENTATION DU RESEAU DE DISTRIBUTION	73
FIGURE 20: PARAMETRAGE DE L'ANGLE D'AMORÇAGE DES THYRISTORS	74
FIGURE 23: ANALYSE HARMONIQUE DU SYSTEME DE DISTRIBUTION DU PORTIQUE P3	74
FIGURE 24: ANALYSE HARMONIQUE DU SYSTEME DE DISTRIBUTION DU TCE AVEC FILTRAGE.....	79
FIGURE 25: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU LIMITEUR D'ENERGIE POUR L'ECLAIRAGE.....	84
FIGURE 26: DONNEE D'ENSOLEILLEMENT JOURNALIER DE LA VILLE DE CASABLANCA.	86
FIGURE 28: MANUTENTION DES CONTENEURS EN MODE TWIN-LIFT ET TANDEM-LIFT	93
FIGURE 27: CHARGEMENT ET DECHARGEMENT DES CONTENEURS EN DUAL CYCLE.....	93
FIGURE 29: FONCTIONNEMENT DES MOTEURS DU LEVAGE EN 4 QUADRANTS	94
FIGURE 30: L'ENERGIE PERDUE LORS DE CHAQUE CYCLE DU LEVAGE	94
FIGURE 31: CYCLES DE LEVAGE EN ALTERNATIF ET EN CONTINU.....	95
FIGURE 32: APPEL DE COURANT AU DEMARRAGE D'UNE MOTO POMPE.....	96

Liste des notations

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
BT	Basse tension (V)
C	Capacité (F)
cos φ	Cosinus du déphasage tension courant
ETAP	Electrical Transient Analyzer Program
I	Courant (A)
L	Inductance (H)
MT	Moyenne tension (V)
P	Puissance active (W)
PA	Puissance appelée (W)
PS	Puissance souscrite (VA)
PV	Photovoltaïque
PL_TCE	Poste de livraison TCE
PS	Puissance souscrite
Q	Puissance réactive (VAR)
RC	Redevance de consommation (DH)
RDPS	Redevance dépassement puissance souscrite (DH)
RPS	Redevance puissance souscrite (DH)
S	Puissance apparente (VA)
TCE	Terminal à conteneurs EST
THD	Taux de distorsion harmonique
U	Tension (V)

Sommaire

AVANT-PROPOS.....	4
LISTE DES TABLEAUX.....	6
LISTE DES FIGURES.....	7
LISTE DES NOTATIONS	8
INTRODUCTION	12
<u>CAHIER DES CHARGES</u>	14
I. INSUFFISANCES RELEVÉES SUR LE RESEAU ELECTRIQUE DU TCE	15
II. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	15
III. RESULTATS ESCOMPTEES DE L'ÉTUDE	16
IV. ORGANISATION DU PROJET.....	16
<u>CHAPITRE 1 : ORGANISME D'ACCUEIL ET SITE OBJET DE L'ÉTUDE</u>	18
I. ORGANISME D'ACCUEIL : MARSA MAROC	19
II. SITE OBJET DE L'ÉTUDE : TCE AU PORT DE CASABLANCA	19
III. FONCTIONNEMENT DU TERMINAL A CONTENEURS.....	20
<u>CHAPITRE 2 : AUDIT ENERGETIQUE</u>	24
I. QU'EST CE QUE C'EST L'AUDIT ENERGETIQUE.....	25
II. DONNEES RELATIVES AU SITE OBJET DE L'ÉTUDE.....	26
II.1 Equipements et installations électriques.....	26
II.1.1 Vue générale.....	26
II.1.2 Distribution de l'énergie électrique	27
II.1.3 Besoins en énergie électrique	29
II.2 Contrats de fourniture d'électricité	34
III. DONNEES DE CONSOMMATION	36
III. ANALYSE DE LA SITUATION ET SYNTHESE	46
IV. ANOMALIES RELEVÉES ET DES RECOMMANDATIONS	47
<u>CHAPITRE 3 : RECOMMANDATIONS POUR LA REDUCTION DE LA FACTURE ELECTRIQUE</u>	50
I. MESURES D'ECONOMIE D'ENERGIE LIEES A LA FACTURATION.....	51
I.1 Composition d'une facture.....	51
I.2 Eléments optimisables	51
I.2.1 Puissance souscrite	51
I.2.2 Facteur de puissance.....	51
I.2.3 Gestion des tranches horaires.....	52

II.	MESURES LIEES AUX EQUIPEMENTS	52
II.1	Portiques à conteneurs	53
II.2	L'éclairage	53
II.3	Bâtiments administratifs	53
CHAPITRE 4 : ETUDE DES AMELIORATIONS ET DES SOLUTIONS PROPOSEES		54
COMPTAGE ELECTRIQUE EN TETE DE BOUCLE.....		56
OPTIMISATION DE LA PUISSANCE SOUSCRITE		58
I.	AVANTAGES DE L'OPTIMISATION	58
II.	CALCUL DE LA PUISSANCE SOUSCRITE OPTIMISEE POUR LE TCE	59
II.1	Algorithme d'optimisation	59
II.2	Résultats obtenus.....	60
GESTION DES TRANCHES HORAIRES		62
COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE ET FILTRAGE DES HARMONIQUES.....		64
I.	GENERALITES ET RAPPELS ESSENTIELS	64
I.1	Energie réactive	64
I.2	Les harmoniques.....	67
II.	ANALYSE HARMONIQUE DU RESEAU DE DISTRIBUTION DU TCE	72
II.1	Outil d'analyse et de simulation	72
II.2	Résultats de l'analyse sans filtrage	74
II.3	Normes et réglementations.....	76
II.4	Interprétation des résultats d'analyse	76
II.5	Résultats d'analyse avec filtrage	77
AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE L'ECLAIRAGE		80
I.	GENERALITES	80
I.1	Types d'éclairage	80
I.2	Paramètres déterminant dans le choix des lampes	80
II.	ACTIONS POUR UN ECLAIRAGE PERFORMANT EN ENERGIE	82
II.1	Actions au niveau des bâtiments	82
II.2	Actions au niveau de l'éclairage public	84
DIMENSIONNEMENT DE PANNEAUX PV POUR UNE ALIMENTATION PARTIELLE		85
I.	DEFINITION DU BESOIN	85
II.	DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION	86
II.1	Détermination de la puissance crête.	86
II.2	Evaluation des pertes et du coefficient Cp.....	86
II.3	Détermination du nombre de modules photovoltaïques	87
II.4	Choix des modules et de l'onduleur	88
II.5	Dimensionnement des batteries	91

MESURES D'ECONOMIE LIEES AUX PORTIQUES A CONTENEURS.....	92
I. MESURES LIEES AU MODE D'EXPLOITATION	92
II. MESURES LIEES AU MODE DE FONCTIONNEMENT	93
II.1 Utilisation d'équipements performants.....	93
II.2 Récupération et stockage de l'énergie sur le portique.....	94
II.3 Privilégier AC ou DC.....	95
II.4 Réduire la consommation des moteurs électriques.....	96
II.4.1 Variateurs de vitesse	96
II.4.2 Moteur haut rendement	97
CHAPITRE 5 : GAINS REALISABLES ET RETOUR SUR INVESTISSEMENT.....	98
I. ECONOMIES SUR LA CONSOMMATION ELECTRIQUE	99
II. ECONOMIE SUR LA FACTURE ELECTRIQUE	101
III. INVESTISSEMENT.....	102
CONCLUSION	105
BIBLIOGRAPHIE.....	107
<u>ANNEXES</u>	109

Introduction

Le coût de l'électricité représente dans bien des secteurs d'activités économiques une part importante des charges d'exploitation, la maîtrise et la réduction de ce coût constituent l'un des facteurs sensibles pour l'amélioration de la compétitivité de l'entreprise. Il est donc recommandé de mettre en œuvre une démarche de gestion rationnelle de la consommation d'électricité liée à l'analyse des termes du contrat de fourniture d'électricité, au suivi de la consommation globale et à la mise en œuvre des solutions permettant une optimisation de la consommation et une meilleure puissance électrique mise en jeu.

La mise en œuvre des concepts modernes de gestion et la fiabilité des alimentations électriques constituent des impératifs pour la sûreté de fonctionnement des installations et la performance des exploitations.

La gestion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie électrique contribuent par ailleurs à la réduction des coûts des services, en conséquence, à l'amélioration de la compétitivité.

Sur la base des considérations ci-dessus, j'ai proposé de travailler sur la problématique de l'efficacité énergétique au port de Casablanca et traiter le sujet suivant :

« Optimisation de la consommation électrique du Terminal à Conteneurs Est au Port de Casablanca »

Le **TCE** est le premier terminal à conteneurs au port de Casablanca, c'est une plate-forme constituant un maillon important dans la chaîne des marchandises conteneurisées. Il nécessite d'importantes installations électriques pour alimenter les engins et les équipements qui assurent les différentes opérations liées à son fonctionnement.

Ce mémoire vise à relever et évaluer les performances électriques des équipements et des procédés dans le but d'identifier les causes de la surconsommation et de proposer un plan d'actions correctives.

Un cahier des charges sera présenté pour situer le contexte du projet et ses phases de réalisation.

Ce mémoire est organisé de la façon suivante :

Premier chapitre : (Présentation du terminal TCE)

Il s'agit de donner une présentation du site objet de l'étude (infrastructures, installations), pour apprécier son importance dans l'activité à laquelle il est voué.

Deuxième chapitre : (Audit électrique)

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'audit électrique réalisé dans le but d'évaluer la situation et élaborer un rapport sur les opportunités d'économie d'énergie.

Troisième chapitre : (Economie d'énergie électrique)

Ce chapitre est consacré à l'identification des moyens à mettre en œuvre en vue d'économiser la consommation, et les gains qui peuvent être escomptés suite à la mise en œuvre des mesures prescrites.

Quatrième chapitre : (Etude des améliorations et des solutions proposées)

Sur la base des recommandations élaborées et solutions esquissées, une étude sera faite sur les améliorations retenues suivant un cahier de charge.

Cinquième chapitre : (Gains réalisables et retour sur investissement)

Ce chapitre sera consacré à une étude sur les gains susceptibles de résulter et le coût budgétaire du projet donnant une estimation du retour sur investissement.

Les résultats obtenus peuvent être transposables aux autres terminaux portuaires, moyennant bien évidemment des adaptations et actions spécifiques.



Cahier des charges

Dans le cadre de la relance de la politique de maîtrise de l'énergie, **Marsa Maroc** incite les différentes directions d'exploitation à s'engager sur la voie de l'utilisation rationnelle de l'énergie électrique. Pour cela, un plan d'action basé notamment sur le soutien aux études d'aide à la décision (pré-diagnostics, audits énergétiques, études de faisabilité) a été décidé. Cette démarche a pour objectif de permettre d'identifier les gisements d'économie d'énergie et de mettre en œuvre des actions de maîtrise des consommations rentables économiquement.

I. Insuffisances relevées sur le réseau électrique du TCE

Des anomalies ont été observées au niveau de la gestion du réseau et de la performance de ses équipements :

- Equipements de postes classiques manœuvrés et commandés localement.
- Relais de protection hétérogènes avec des problèmes de sélectivité et coordination.
- Transit de puissance non connu dans toutes les artères du réseau
- Exploitation et maintenance non aisées
- Absence de système de gestion d'énergie
- Aucune mesure particulière d'économie d'énergie n'est mise en œuvre bien que des essais ont eu lieu récemment concernant l'emploi de luminaires à LED et le recours aux régulateurs réducteurs de puissance.
- Présence d'une pollution harmonique importante sur les départs alimentant les portiques, ce qui se traduit par un faible facteur de puissance et des pénalités conséquentes.
- Dégradations importantes et répétitives des alimentations des conteneurs frigorifiques (Arrachement des prises et des tableaux lors du déplacement des conteneurs).
- Dégradation des mâts d'éclairage suite aux collisions des cavaliers avec les gardes corps des mâts qui ne résistent pas toujours.

II. Contexte de l'étude

Ce projet vise à réaliser un diagnostic général des constituants de la boucle alimentant le **TCE**, et analyser l'évolution des consommations électriques ainsi que la qualité énergétique. Ceci dans le but d'améliorer les performances et la gestion énergétique du réseau électrique du **TCE**.

Ce travail comporte les 3 phases suivantes:

Première phase : Réalisation de l'audit électrique

- Relevé sur le site, examen et description précis et minutieux des locaux (usage de l'énergie électrique, consommations facturées...), examen des modes de gestion, des contrats, ...
- Exploitation et traitement des données recueillies: calculs et interprétations de ces derniers pour mettre en évidence les améliorations à envisager.
- Etablissement d'un cahier d'anomalies et non conformités.

Deuxième phase : Etude technique des solutions et actions à mettre en œuvre.

Troisième phase : Evaluation technico-économique des solutions proposées.

III. Résultats escomptés de l'étude

Les objectifs à atteindre au terme de l'étude :

- Optimiser les contrats de fourniture d'électricité
- Quantifier les consommations inutiles ou perdues
- Identifier les gisements d'économie d'énergie
- Mettre en place des systèmes de gestion d'énergie et de réduction des consommations.
- Relever le facteur de puissance par la compensation de l'énergie réactive et le filtrage des harmoniques.

IV. Organisation du projet

Le projet est conduit selon les étapes suivantes :

1. Collecte des informations et données relatives au réseau électrique du TCE: synoptiques de distribution HTA et BT, plans d'implantation des équipements et consommateurs d'électricité, plans d'implantation des réseaux (postes, canalisations, tableaux), schémas électriques unifilaires des tableaux, puissances des équipements,
2. Collecte des informations et données relatives à l'exploitation du réseau électrique : factures, historiques des incidents, plans et coûts de maintenance, ...

3. Visualisation des installations et recueil des anomalies éventuelles,
4. Analyse et diagnostic de la situation et élaboration d'un cahier d'anomalies et des améliorations à opérer,
5. Etude des solutions de mise à niveau, de fiabilisation et d'amélioration des performances du réseau électrique du TCE,
6. Etude des solutions d'optimisation de gestion de l'énergie électrique dans le TCE,
7. Etude des possibilités d'exploitation des énergies renouvelables au niveau du TCE et de l'opportunité de mettre en place des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques pour prendre en charge les bâtiments et l'éclairage du TCE,
8. Evaluation des coûts des solutions retenues et de leur impact sur les performances du réseau électrique du TCE.

Chapitre 1 : Organisme d'accueil et site objet de l'étude

I. Organisme d'accueil : Marsa Maroc

L'**ODEP** (Office d'Exploitation des Ports) s'est scindé en **2006** pour donner naissance à deux entités séparées : **Marsa Maroc** et l'**ANP**. **Marsa Maroc** est spécialisée dans l'exploitation des terminaux et quais portuaires.

L'entreprise **Marsa Maroc** assure [1] :

- le traitement des navires et des marchandises transitant par les ports marocains,
- le service d'aide à la navigation,
- le pilotage, le remorquage, le lamanage et l'avitaillement des navires,
- la manutention et l'entreposage des marchandises,
- l'accolage et le magasinage des marchandises,
- la gestion des gares maritimes et leurs annexes,

Les différents sites d'implantation de **Marsa Maroc** sont représentés par l'organigramme ci-dessous:

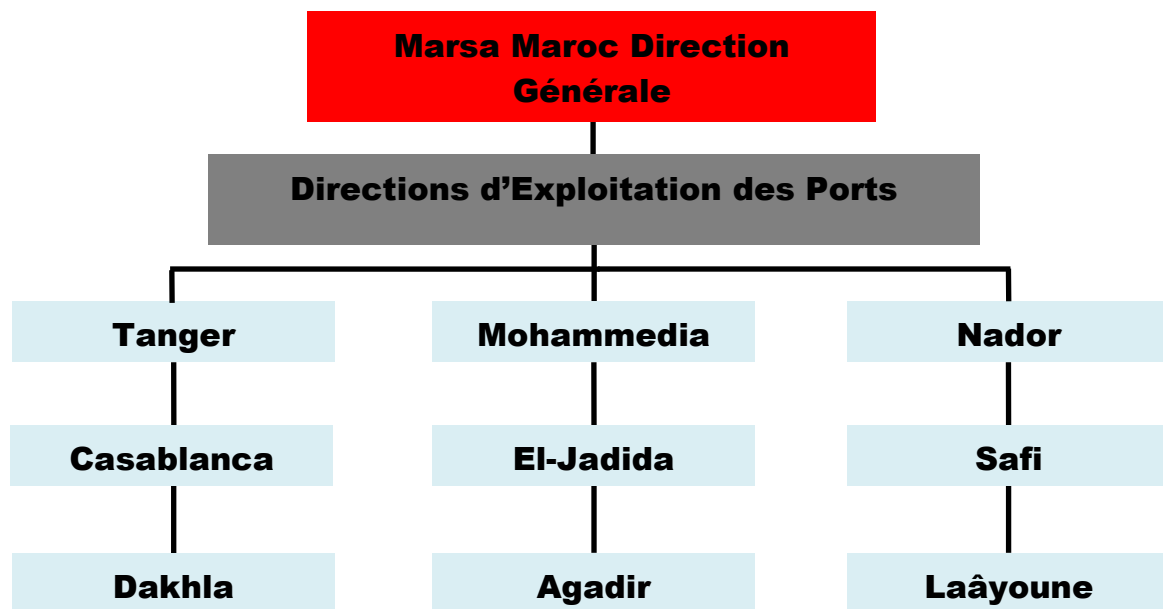


Figure 1: Ports d'implantation de Marsa Maroc

La moitié du trafic portuaire traité par **Marsa Maroc** passe par le port de Casablanca.

II. Site objet de l'étude : TCE au Port de Casablanca

Le Grand Port de Casablanca existe depuis 1913, il est le premier port au Maroc et le deuxième en Afrique. Il constitue un pôle économique majeur dans le paysage à la fois urbain et maritime de la ville de Casablanca.

Ce port constitue l'entrée maritime non seulement pour les visiteurs étrangers, mais aussi pour les marchandises. Il traite des millions de tonnes de marchandises chaque année, il est aussi la porte vers le monde extérieur pour les citoyens marocains et pour les exportations agricoles et industrielles du pays.

Le port de Casablanca dispose de divers terminaux, dont chacun est spécialisé dans un type de marchandise ou d'activité [1].

- terminal à conteneurs I **TCE** ; d'une capacité de **700 000** conteneurs EVP,
- terminal à conteneurs II ; d'une capacité de **300 000** conteneurs EVP,
- terminal à conteneurs III **TC3** ; d'une capacité de **600 000** conteneurs EVP,
- terminal des phosphates ; d'une capacité de **18 millions** de tonnes,
- terminal des Agrumes ; d'une surface de 18,6 ha,
- terminal Minéralier et Hydrocarbures ; d'une surface de 14,5 ha,
- terminal Roulier ; d'une surface de 9,6 ha,
- terminal voiturier.



Figure 2: Vue aérienne du terminal TCE au port de Casablanca

Le **TCE** est le plus grand des terminaux du port du Casablanca, d'une superficie totale de 60 hectares. Il offre une capacité d'accostage de 600 mètres.

III. Fonctionnement du terminal à conteneurs

Le rôle de ce terminal est de servir de plateforme de transbordement entre les navires porte-conteneurs et les autres modes de transport plus locaux.

Les infrastructures nécessaires pour son fonctionnement sont :

- **Zone d'opérations portuaires « le quai »** : le rôle de cette zone est de servir de point de transfert des conteneurs entre le terminal et les navires. la partie du terminal où sont effectuées, les opérations de chargement et de déchargement des navires après leur accostage.
- **Zone de stockage du terminal « la cour »** : le parc à conteneurs est une installation de stockage intermédiaire, dans lequel les conteneurs restent de quelques heures à quelques semaines, qu'ils soient d'import en attente d'être livrés au client ou d'export en attente d'embarquer sur d'autre navires.
- **Zone d'opérations terrestre** : c'est la zone de livraison ou de sortie des conteneurs, elle est configurée suivant le mode de transport.

Le processus général de fonctionnement peut être décrit comme une séquence d'opérations à partir de l'arrivée des navires porte-conteneurs jusqu'au départ des conteneurs du port ou vice-versa [2].

Depuis l'annonce de l'escale d'un navire au **TCE** jusqu'à la livraison de la marchandise à son propriétaire, divers services sont rendus pour que le traitement soit réalisé dans les meilleures conditions de délai, de coût et de sécurité.

❖ **L'arrivée du navire**

Tout navire devant toucher le terminal doit adresser à la capitainerie un message indiquant tous les détails (le nom du navire, le nom de l'armateur, le pavillon, les caractéristiques techniques : longueur hors tout, tirant d'eau, jauge brute et nette, la date et l'heure prévues d'arrivée, le genre de navigation pratiquée, la provenance, l'année de construction du navire, la nature et le tonnage de la cargaison.

Des formalités sont à accomplir à l'arrivée du navire :

- Accueil par radiocommunication du navire sur rade par la Capitainerie du port,
- contrôle d'entrée au port par l'administration maritime,
- visite d'inspection à bord par les autorités (santé, douane, police),
- attribution d'un poste à quai en fonction du tirant d'eau, de la longueur et du type de cargaison.

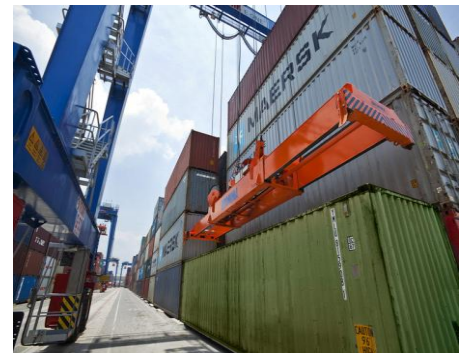
❖ Amarrage / Lamanage

L'amarrage d'un navire est la dernière phase d'une manœuvre d'accostage, il consiste à le maintenir contre un quai ou un ponton à l'aide d'aussières (ou amarres), longs cordages de diamètres variables selon la taille du navire, capelées d'une part au quai sur des bittes ou des anneaux et d'autre part sur le navire à l'avant et à l'arrière.



❖ Manutention

Dans le domaine portuaire, elle désigne la manipulation de charges à l'aide d'engins mécaniques, tel que les chariots élévateurs, les portiques et autres engins dédiés au chargement et déchargement des véhicules de transport (navires, camions, wagons...).



❖ Entreposage

Le stockage des conteneurs déchargés est réalisé en fonction de certains critères. L'idée directrice est de les disposer dans un ordre précis de façon à les appréhender et à les reconnaître rapidement.

Les conteneurs sont classés en fonction de leur destination et de leur type.

Selon la nature de la marchandise, un positionnement particulier est également prévu. Pour les conteneurs frigorifiques, des zones équipées de branchements électriques sont prévues pour permettre d'assurer une fourniture de froid continue. Pour les marchandises dites dangereuses, des emplacements sont également prévus, en général en périphérie de terminal.



❖ Livraison des conteneurs

Les conteneurs peuvent faire l'objet de livraison directe ou indirecte.

- **Livraison directe :**

Après pointage et remise d'un ordre de livraison, les conteneurs sont acheminés vers leur lieu de destination, munis d'une feuille de route.

- **Livraison indirecte :**

Les conteneurs sont entreposés à ciel, avec un temps gratuit de huit jours et frais d'entreposage appliqués après expiration du délai.

Chapitre 2 : Audit énergétique

I. Qu'est ce que c'est l'audit énergétique

On entend par audit énergétique, toute opération de diagnostic de la consommation d'énergie au sein d'un établissement à travers la réalisation de recherches, d'études et de contrôles visant à évaluer le niveau de performance énergétique, à analyser les insuffisances, les causes et à proposer les actions correctives.

L'audit électrique qui porte essentiellement sur l'identification des gisements d'économie d'énergie électrique, fait partie de l'audit énergétique global. Il se base sur une analyse détaillée de la qualité des puissances fournies par le distributeur d'électricité au niveau du réseau électrique ; aussi bien du côté de l'alimentation (postes de transformation et tableaux généraux basse tension « TGBT ») qu'au niveau des charges et des machines.

L'audit électrique permet aussi d'analyser la pollution électrique au niveau des TGBT et au niveau des charges polluantes. Par conséquent, grâce à ce diagnostic, il est possible de mesurer l'ampleur des courants harmoniques responsables de la détérioration des équipements et de la surfacturation.

Les effets induits par la mise en œuvre de l'audit électrique et les correctifs qu'il entraîne sur la consommation comportent, non seulement un volet économique évident mais répondent également aux obligations relatives à la protection de l'environnement (réduction des émissions de gaz à effet de serre).

D'une manière générale, l'audit électrique doit comporter les 3 phases suivantes **[3]**:

Etape 1 : Descriptif des principales installations techniques, examen des contrats d'approvisionnement et des modes de gestion, bilan électrique sur au moins une année, bilan sommaire des principaux consommateurs électriques.

Etape 2 : Exploitation et traitement des données recueillies: calculs et interprétations de ces derniers pour identifier les potentiels d'amélioration et mettre en évidence les améliorations à envisager.

Etape 3 : Etablissement du rapport d'audit qui doit contenir une analyse détaillée des causes d'insuffisances et du niveau des performances énergétiques, du plan d'actions permettant d'optimiser la consommation, et les études techniques complémentaires éventuelles à réaliser.

II. Données relatives au site objet de l'étude

II.1 Equipements et installations électriques

II.1.1 Vue générale

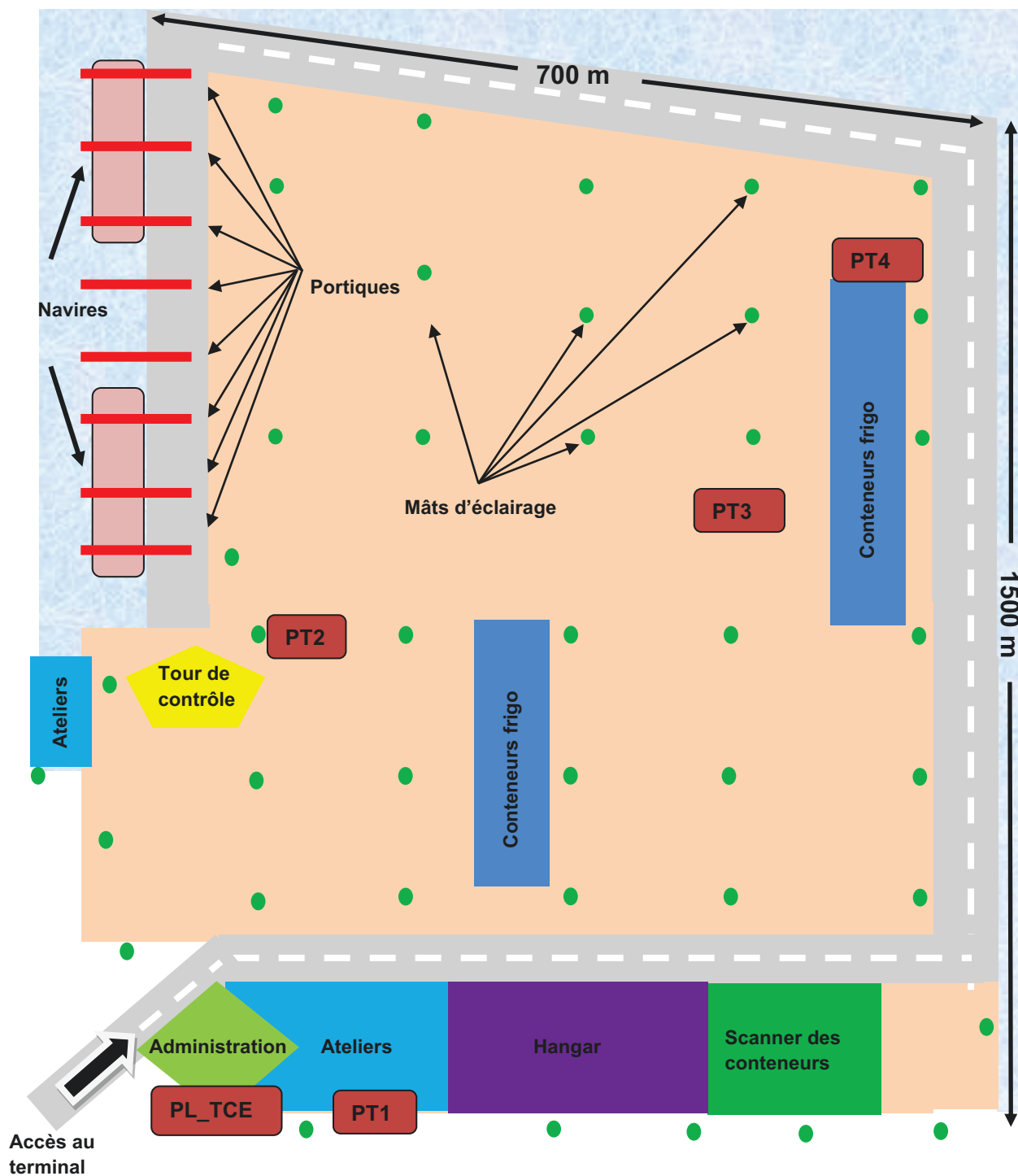


Figure 3: Plan du TCE

Les principaux éléments constituant cette vue seront détaillés dans les paragraphes qui suivent.

II.1.2 Distribution de l'énergie électrique

La distribution de l'énergie électrique à l'intérieur du port, se fait en réseau bouclé (**coupure d'artère**) HTA 5.5 kV via deux postes abaisseurs alimentés par le réseau 20 kV du Distributeur LYDEC :

- Le premier poste nommé **Ancien Poste Abaisseur**, est équipé de deux transformateurs (10 MVA 20 kV/5,5 kV) travaillant en alternance.
- Le deuxième poste nommé **Nouveau Poste Abaisseur**, est équipé d'un seul transformateur (10 MVA 20 kV/5,5 kV).

Lorsque j'ai débuté l'étude, le TCE est alimenté via un poste de distribution secondaire, lui-même alimenté par les postes abaisseurs. La boucle HTA du TCE, comprenant 4 postes de transformation, était gérée par l'ANP (Agence Nationale des Ports) et chaque poste était un pont d'abonnement (**Marsa Maroc** paie à la fin de chaque mois 4 factures). L'étude de restructuration des réseaux au port de Casablanca ainsi que l'étude d'efficacité énergétique (Dont je traite la partie TCE) ont conduit à regrouper les 4 comptages en un seul via un poste de livraison frontière (**PL_TCE**).

Le synoptique ci-dessous donne la nouvelle structure du réseau du TCE :

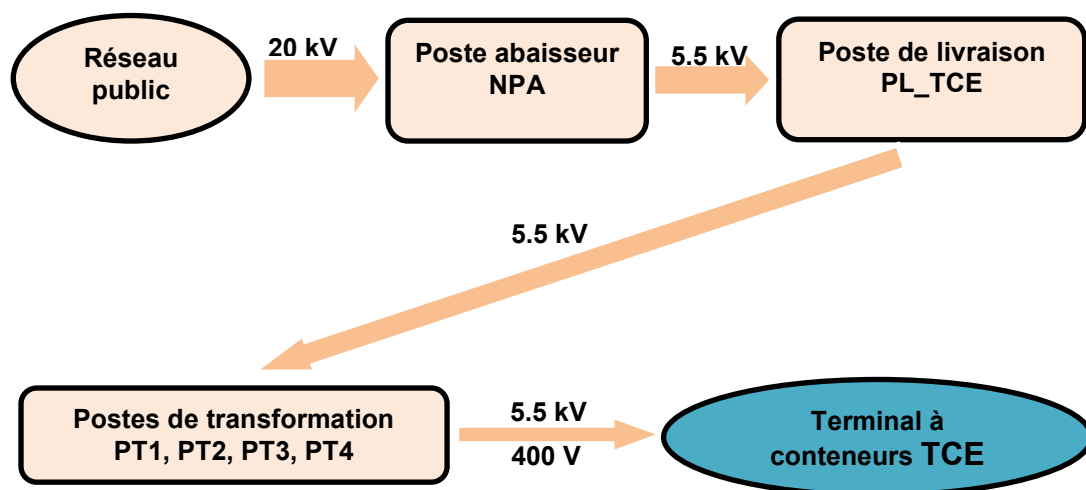


Figure 4: Synoptique distribution électrique au TCE

Le poste de livraison est alimenté par deux arrivées issues du poste abaisseur. De son côté, il desserre en boucle le TCE, via deux demi jeu de barres de 1250A/5.5kV appelés départ A et B. Les jeux de barre sont couplables par un disjoncteur débrochable (cf. fig.5).

Le poste de livraison est équipé d'un transformateur 5.5kV/400V 630 kVA pour l'alimentation BT des auxiliaires du poste et des zones environnantes du poste.

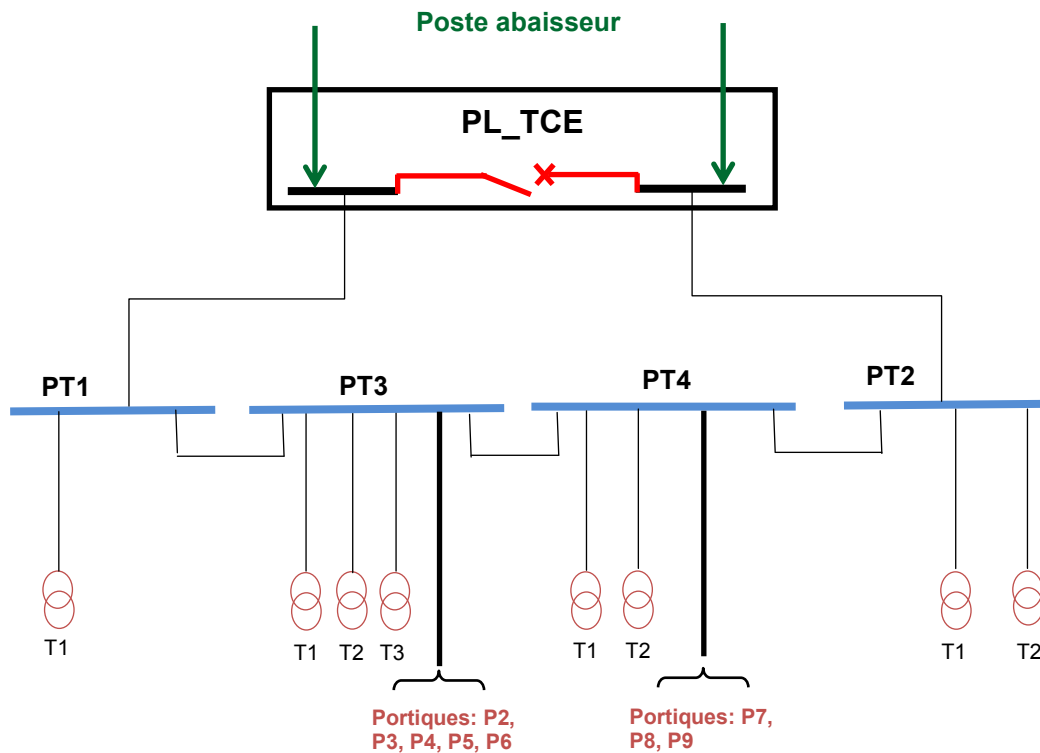


Figure 5: Synoptique de la boucle alimentant le TCE en HTA

La boucle comprend quatre postes qui alimentent :

- Directement en 5,5 kV les portiques
- Les réseaux BT, via des transformateurs HTA/BT 5,5 kV / 400 V

La puissance appelée au niveau de la boucle est de l'ordre de 3000 kVA, les postes électriques constituant la boucle contiennent des transformateurs HTA/BT pour alimenter le réseau BT par contre les portiques à conteneurs sont alimentés directement en HTA (cf. fig.5).

Des batteries de compensation de l'énergie réactive sont installées au niveau des TGBT des postes (cf. Tab.2)

- Transformateurs HTA/BT

Poste	Puissance unitaire du transformateur (kVA)		Marque	Année	Tensions	Puissance installée (kVA)
PL_TCE						
PT 1						
PT 2						
PT 3						
PT 4						

Tableau 1: Transformateurs HTA/BT au TCE [1]

- Condensateurs de compensation de l'énergie réactive

Poste	Compensation à vide			Compensation en charge (Automatique)
	TR1	TR2	TR3	
PL-TCE				
PT1				
PT2				
PT3				
PT4				

Tableau 2: Condensateurs de compensation de l'énergie réactive [1]

II.1.3 Besoins en énergie électrique

Pour assurer les différentes opérations liées à son fonctionnement, le **TCE** possède un parc d'équipements constitué notamment de:

- 8 portiques dont 2 post-panamax,
- 50 chariots cavaliers,
- 50 tracteurs à sellette,
- 28 élévateurs pour conteneurs,
- 80 remorques,
- 400 branchements électriques pour les conteneurs frigos.

La consommation électrique est principalement répartie sur 4 secteurs : les portiques, l'éclairage public, les conteneurs frigo et les bâtiments.

❖ Les portiques à conteneurs

Le parc des portiques à conteneurs est composé de 8 portiques :

Portique	Constructeur	Année de construction	Tension d'alimentation	Puissance installée
P2				
P3				
P4				
P5				
P6				
P7				
P8				
P9				

Tableau 3: Les portiques à conteneurs implantés au TCE

Les puissances installées dans les portiques varient de **1250kVA** et **1800 kVA**, la consommation d'un portique est répartie entre les systèmes motorisés alimentés par des convertisseurs de puissance et les équipements de fonctionnement (éclairage, climatisation ...).

Ce synoptique décrit les parties constituant le **portique à conteneurs P5**, il est transposable aux autres portiques.

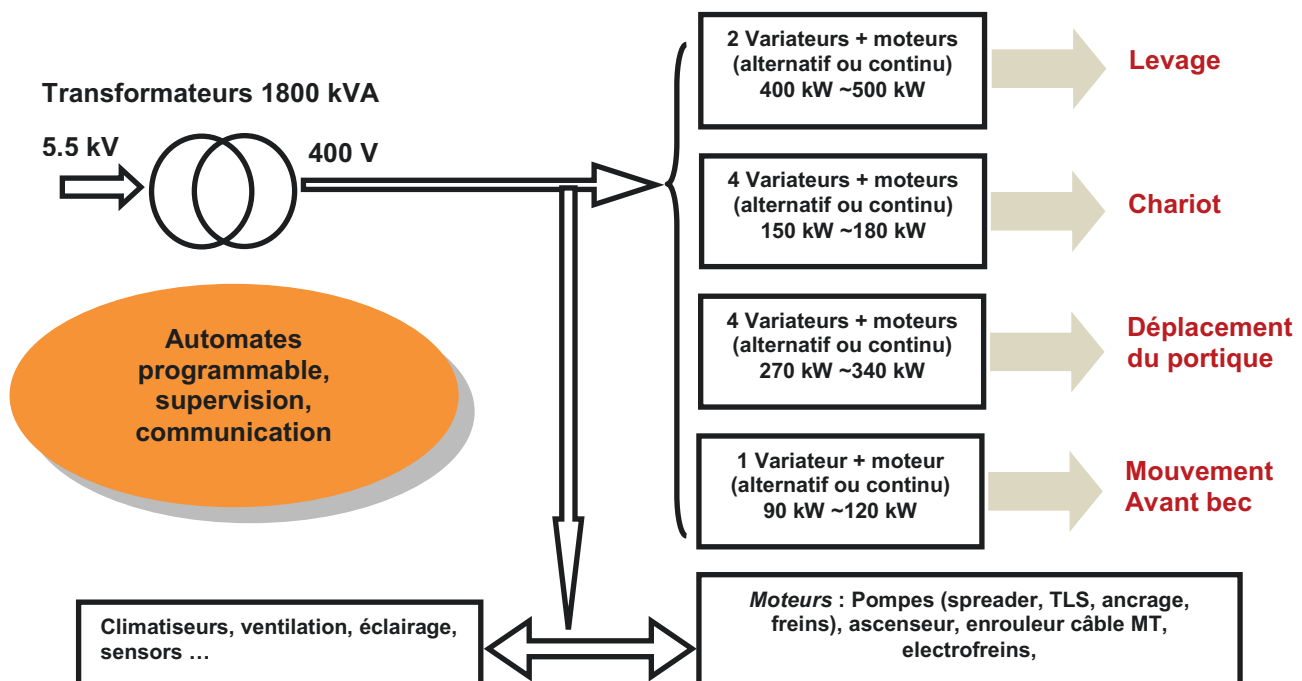


Figure 6: Synoptique électrique du portique à conteneurs

❖ **Bilan de puissance de P5 :**

- Transformateur principal : 5.5kV /400V d'une puissance de **1600 kVA**, pour l'alimentation des circuits principaux tel que les moteurs.
- Transformateur auxiliaire : 5.5kV /400V d'une puissance de **200 kVA**, pour l'alimentation des circuits auxiliaires tel que l'éclairage, le chauffage, climatisation....

Fonction	Equipement	P _{unitaire} (KW)	Nombre	P _{totale} (KW)
Mécanisme levage				
Mécanisme chariot				
Mécanisme avant Bec				
Mécanisme translation				
Enrouleur câble MT				
Spreader				
Eclairage				
Climatisation				
Ascenseur				
Pont roulant				
Ventilation				
Ancrage portique				
Trim List				
Total				

Tableau 4: Bilan de puissance du portique

❖ **branchements électriques pour les conteneurs frigos**

Ce sont 400 prises de courant, destinées à alimenter les conteneurs frigo.

Dès qu'un conteneur frigo est débarqué à terre, il doit être



branché afin de maintenir la température de la marchandise.

En général, pour alimenter un conteneur frigo, il faut prévoir une puissance instantanée comprise entre 6 kW et 12 kW.

Soit pour l'ensemble des prises, une puissance comprise entre 2400 kW et 4800 kW

❖ L'éclairage public

Le système d'éclairage installé au terminal, est composé essentiellement de mâts et de candélabres.

Chaque mât (Hauteur = 35 m) est équipé d'une couronne portant 6 à 10 projecteurs équipés, chacun, d'une lampe **SHP 1000 W** ou 2 lampes **SHP 400 W**.



Les caractéristiques du matériel d'éclairage public au **TCE** sont spécifiées dans le tableau ci-dessous :

type du matériel	Hauteur (m)	Nombre de lampes par matériel	Puissance unitaire par lampe (W)	Puissance mât ou candélabre (kW)	Nombre de matériels	Puissance (majorée de 10 % de consommation des ballasts) (kW)
Mat A						
Mat B						
Candélabre						
Total (kW)						

Tableau 5: Matériels d'éclairage public du TCE [1]

❖ Bâtiments

Bâtiments	Fonction	Description	Pu (W)	Nombre	Pt (W)
Bâtiment administratif					
Atelier engins de parc					

Atelier engins de levage					
Hangar Magasin					
Vestiaire engins de levage					
Vestiaire engins de parc					
Salle de contrôle du trafic					
Bungalows					
Passerelle roulier					
Total					

Tableau 6: Bâtiments du TCE

Le secteur du bâtiment est un poste consommateur prépondérant, a raison d'une durée de fonctionnement journalière de 10 h l'énergie électrique consommée par les bâtiments est estimée à par an.

II.2 Contrats de fourniture d'électricité

Au début du projet la distribution électrique au **TCE** était régie par 4 contrats de fourniture qui fixent les conditions d'approvisionnement en électricité et les tarifs utilisés pour la facturation de l'énergie consommée. L'identification des principales caractéristiques de ces contrats (type de contrat, option tarifaire, périodes tarifaire, durée d'utilisation) permet de savoir si l'ensemble de ces points est bien conforme au profil de consommation.

▪ Puissances souscrites : PS

Par définition, la puissance souscrite est la puissance que le distributeur est obligé de garantir au client, malgré les fluctuations énergétiques qu'elle peut connaître. Cependant, lorsque cette puissance est dépassée par le client, le distributeur applique à ce dernier une pénalité.

Poste	PT1	PT2	PT3	PT4
Puissance souscrite				

Tableau 7: Puissances souscrites des postes électriques du TCE

▪ Saisons et postes horaires

La tarification de l'énergie électrique ne tient pas compte seulement du nombre de kwh consommés, mais aussi de la tranche horaire durant laquelle a eu lieu cette consommation.

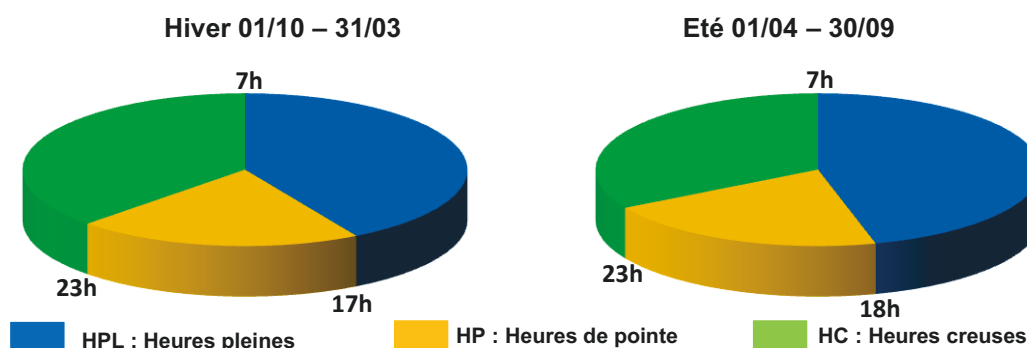


Figure 7: tranches horaires de tarification électrique

▪ Nature de la fourniture d'énergie

L'énergie est fournie sous forme de courant alternatif triphasé à la fréquence de 50 Hz. La tension d'alimentation aux points de livraison est de 5,5 KV, la tolérance est de 10 % en plus ou en moins.

▪ **Mode de facturation**

Le montant à facturer pour les consommations au niveau de chaque poste est la somme des redevances calculées en fonction des éléments suivants :

- **Redevance de consommation : RC**

Cette redevance est égale à la somme des consommations dans chaque poste horaire après application de l'option tarifaire concernée.

$$RC = pHP \times Cons HP + pHPL \times Cons HPL + pHC \times Cons HC$$

pHP : Prix unitaire du kWh consommé en heures de pointe

pHPL : Prix unitaire du kWh consommé en heures pleines

pHC : Prix unitaire du kWh consommé en heures creuses

Cons : Energie active consommée durant une tranche horaire donnée

- **Redevance de puissance souscrite : RPS**

La redevance de puissance est facturée en fonction de la puissance souscrite annuellement, elle est calculée pour l'année et est facturée mensuellement par douzième ; son montant est déterminé par la formule suivante :

$$RPS = PF \times PS$$

PF: Prime fixe ou le prix unitaire de 1 kVA souscrit

PS : Puissance souscrite

- **Redevance de dépassement de la puissance souscrite : RDPS**

Si au cours d'un mois donné de l'année la puissance appelée enregistrée a dépassé la valeur de la puissance souscrite, la différence positive des deux puissances sera passible d'une redevance dite de dépassement de puissance souscrite (RDPS) déterminée comme suit :

$$RDPS = 1,5 \times PF \times (PA - PS)$$

PA : Puissance maximale appelée pendant le mois

- **Majoration pour facteur de puissance inférieur au minimum contractuel fixé à 0,8 (Maj. (cos phi))**

Si au cours d'un mois de facturation, la quantité d'énergie réactive consommée par le client est telle que le facteur de puissance moyen mensuel correspondant est inférieur à 0,8, le montant total des redevances dues par le client au titre de sa consommation mensuelle (redevance de puissance souscrite, redevance de dépassement de la puissance souscrite et redevance de consommation) sera majoré de 2% pour chaque centième d'insuffisance du facteur de puissance constatée :

$$\text{Maj. (cos phi)} = 2 \times (0,8 - (\text{cos phi})) \times (\text{RC} + \text{RP} + \text{RDPS})$$

- **Les redevances de location et d'entretien des compteurs**

Ce sont des redevances mensuelles fixes qui sont liées au type des compteurs installés.

- **Tarifs de facturation**

Les tarifs sont exprimés en dirhams HT :

- **PF** : Prime fixe par kVA et par mois : **32,64833 DHs**
- **RC** : Redevance de consommation par kwh :

Tranche	Tarif (DHs)
Heures de pointe	1,24492
Heures pleines	0,81886
Heures creuses	0,53417

Tableau 8: Tarifs de la consommation électrique

III. Données de consommation

Les mesures sont prises des compteurs installés sur les 4 postes HTA, les données des consommations de l'énergie sont relevées à la fin de chaque mois.

- **Consommation globale**

L'énergie électrique consommée au **TCE** en 2011 est **5 081 917 kwh**, le graphe suivant donne un aperçu sur l'évolution de la consommation au niveau de chaque poste.

Figure 8: Consommations electriques au TCE

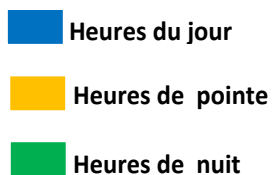
La consommation globale de l'énergie électrique au TCE a une tendance à la hausse pendant les mois de janvier, février, juin et juillet.

- **Consommation par tranches horaires**

Ci-dessous la répartition de la consommation globale du TCE sur les trois tranches horaires.

	Jour	Nuit	Pointe	Totale
Janvier				
Février				
Mars				
Avril				
Mai				
Juin				
Juillet				
Aout				
septembre				
Octobre				
novembre				
décembre				
Totale				

Tableau 9: consommation électrique par tranche horaire



▪ Puissances appelées

L'évolution de la puissance maximale appelée par rapport à la puissance souscrite est représentée sur les graphes suivant :

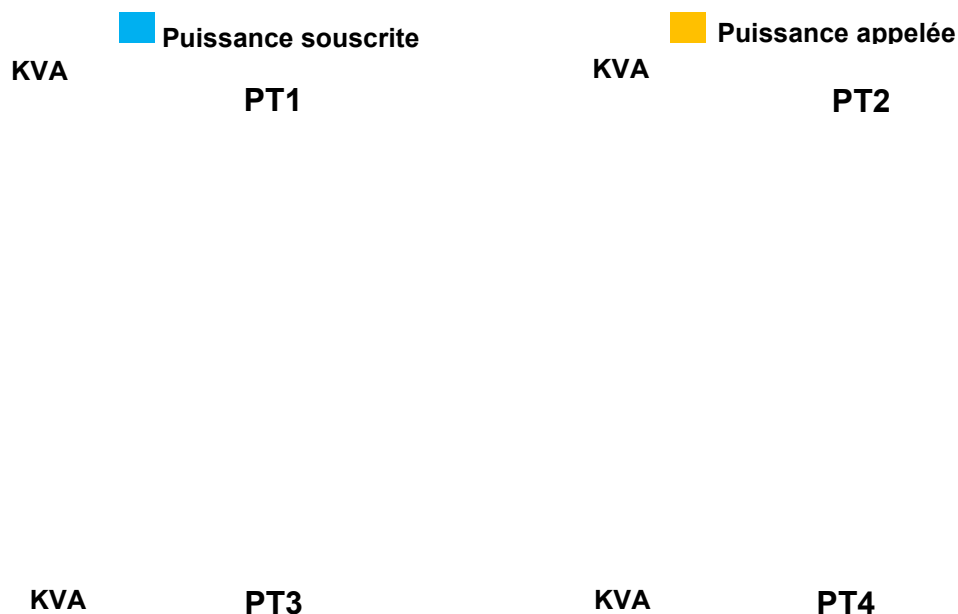


Figure 9: Puissances appelées et puissances souscrites

On remarque des dépassements qui sont enregistrés au niveau des postes PT1 et PT2.

▪ Consommation électrique des portiques

Portique		P2	P3	P4	P5	P6	P7	Totale
Janvier	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Février	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Mars	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							

Avril	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Mai	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Juin	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Juillet	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Aout	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Septembre	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Octobre	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Novembre	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							
Décembre	Cons en kwh							
	Cons en kvarh							

Tableau 10: Consommation électrique des portiques à conteneurs

▪ Distribution de la consommation de l'énergie active

L'énergie active mensuelle totale consommée par les portiques est représentée dans l'histogramme ci-dessous et comparée aux autres consommations du terminal. L'importance relative de chacune des consommations permettra de cibler et de visualiser les pistes d'économie d'énergie.

Figure 10: Répartition de la consommation de l'énergie active

Les équipements de manutention, les conteneurs frigo et l'éclairage sont les postes consommateurs les plus dominants. C'est pour cette raison qu'ils méritent un grand intérêt et une étude approfondie pour améliorer leurs efficacités.

▪ Répartition de la consommation de l'énergie réactive

L'histogramme suivant représente de même les consommations d'énergie réactive consommée durant l'année 2011 :

Figure 11: Répartition de la consommation de l'énergie réactive

L'énergie réactive est principalement consommée par les portiques qui contribuent à hauteur de 80% de la consommation globale.

▪ Indices de performance électrique des portiques

Le tableau suivant donne le nombre de conteneurs manutentionnés par mois au cours de l'année 2011 et les consommations électriques correspondantes des portiques. Cela servira à déterminer et apprécier l'indice de performance énergétique.

Mois	Nombre de conteneurs manutentionnés	Consommation portiques (KWh)
Janvier		
Février		
Mars		
Avril		
Mai		
Juin		
Juillet		
Aout		
Septembre		
Octobre		
Novembre		
décembre		
Totale		

Tableau 11: Production et consommation électrique des portiques

Les figures suivantes montrent le profil de la consommation électrique en fonction de la production du portique, le profil est approché par une courbe de régression linéaire (sous forme de: $y = a x + b$) :

Figure 12: Consommation globale en fonction du nombre de boites manutentionnées

Figure 13: Consommation des portiques en fonction du nombre de boites manutentionnées

Observations et commentaires :

Les courbes de tendance permettent de fournir :

- La consommation électrique fixe mensuelle

- La consommation électrique moyenne par unité produite (boîte manutentionnée)

L'intérêt des courbes de tendance se situe dans le suivi que l'on en fait, l'objectif étant de réduire les consommations fixes et de réduire les ratios spécifiques au plus bas possible.

A partir des courbes de tendance, on s'aperçoit qu'une partie de la consommation électrique des portiques reste fixe quelque soit le nombre de boîtes manutentionnées. Elle est estimée à par mois.

La consommation électrique globale du TCE comprend une composante fixe qui est environ.

- **Facteurs de puissance**

Ci-dessous, les $\cos \varphi$ enregistrés au niveau des postes de transformation :

	PT1	PT2	PT3	PT4
Janvier				
Février				
Mars				
Avril				
Mai				
Juin				
Juillet				
Août				
Septembre				
Octobre				
Novembre				
Décembre				

Tableau 12: Facteurs de puissance enregistrés en 2011

Le $\cos \varphi$ traduit le déphasage qui existe entre le courant et la tension utilisée, si ce facteur de puissance est inférieur à 0,8 une pénalité sera appliquée. Le tableau montre que le facteur de puissance reste faible au niveau des postes PT3 et PT4.

- **Pollution en harmoniques**

Ci-dessous une représentation du spectre des harmoniques prélevées sur le TGBT d'un portique, en une journée.

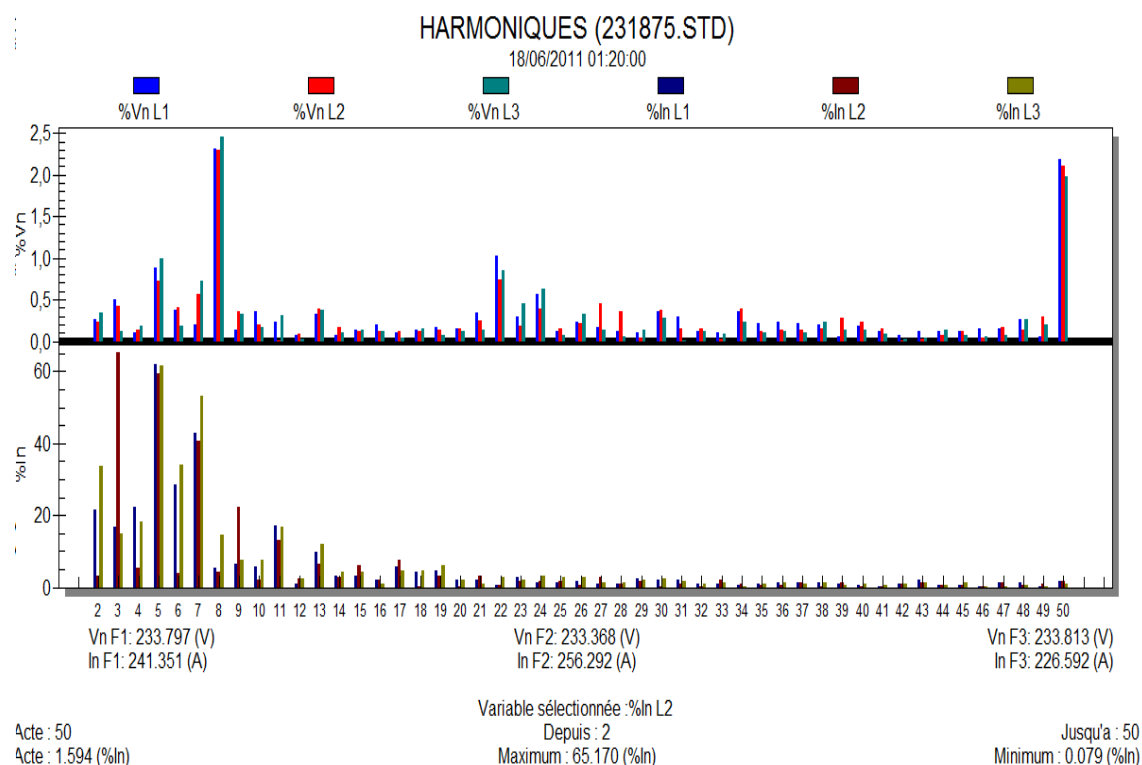


Figure 14: Spectre des harmoniques prélevées sur un portique

Une importante pollution harmonique est observée sur le spectre des courants et des tensions, en particulier au niveau des rangs 3, 5 et 7.

▪ Détails de la consommation électrique en 2011

La contribution des différentes composantes de la facturation dans la facture globale est détaillée dans le tableau ci-dessous :

Mois	Energie consommée (DHS)	RPS (DHS)	RDPS (DHS)	Pénalités cos φ	Montant de facture (DHS)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					

12					
Total					
%					

Tableau 13: Détails de la facture électrique de 2011

20% de la facture électrique est due aux pénalités causées par les dépassements de la puissance souscrite et les mauvais facteurs de puissance, c'est l'équivalent de **1,67 millions de DHS** par an.

▪ Eclairage

Les types des matériels d'éclairage utilisés au **TCE** sont décrits dans le tableau suivant :

Entité	Type d'éclairage	Pu (W)	Nombre	Pt (W)
Bâtiment administratif				
Atelier engins de parc				
Atelier engins de levage				
Hangar Magasin				
Vestiaire engins de levage				
Vestiaire engins de parc				
Salle de contrôle du trafic				
Bungalows				
Passerelle roulier				
Portiques à conteneur				
Eclairage public				

L'éclairage est un poste consommateur dont la consommation électrique journalière varie suivant les saisons. Sa contribution dans la consommation globale est de 20%.

▪ Taux ou facteur de charge

Un paramètre utile à la détermination de l'effet relatif de la demande maximale sur la facture d'électricité et à l'évaluation des opportunités de réduction de la demande est le facteur de charge. Il est défini comme le rapport de la consommation électrique effective mensuelle à la consommation électrique fictive correspondant à la demande maximale du mois. Ce facteur peut être calculé mensuellement à partir de la facture d'électricité ou calculé par une moyenne sur l'année.

Il est donné par l'équation suivante :

$$\text{Taux de charge} = \frac{\text{nombre de kWh consommés sur la période facturation}}{\text{puissance max en kWh} \times \text{nombre d'heures de la période facturation}}$$

Un facteur de charge faible renseigne sur l'existence des possibilités de contrôle de la puissance appelée par l'entreprise, il est impossible d'obtenir un facteur de charge idéal (c'est-à-dire égale à 1) mais un facteur de charge élevé correspond à une meilleure utilisation de la capacité de l'entreprise et à un coût moyen d'énergie plus faible [4].

Les facteurs de charge alculés sont présentés dans le tableau suivant :

Mois	Consommation (kWh)	Indice de max (kWh)	Facteur de charge
Janvier			
Février			
Mars			
Avril			
Mai			
Juin			
Juillet			
Aout			
Septembre			

Octobre			
Novembre			
Décembre			
Totale			

Tableau 14: Facteurs de charge du TCE

Le facteur de charge mensuel du TCE, varie entre 0,32 et 0,55, ces valeurs nous renseignent sur la possibilité de contrôle de la puissance appelée.

III. Analyse de la situation et synthèse

Cette étape fournit les données indispensables à la mise en œuvre d'une démarche d'efficacité énergétique.

L'analyse des données collectées a donné lieu aux interprétations suivantes :

- La consommation électrique au niveau du poste PT1 garde le même niveau au cours de l'année ce qui signifie une stabilité des charges alimentées par ce poste.
- La consommation au niveau des postes PT2, PT3, PT4 est fluctuante, elle est caractérisée par une tendance à la baisse en Septembre/Novembre et Mars/Avril et une tendance à la hausse en décembre et Juin avec des pics de consommation enregistrés aux mois de Juillet et Août.
- La consommation en 2011 a très légèrement reculé par rapport à 2010, cette situation s'explique par le recul qu'a connu le trafic conteneurisé.
- Mauvaise exploitation de la tranche horaire de nuit qui est la moins chère, Par contre une part importante de la consommation est enregistrée pendant la tranche heures de pointe.
- Manque de cohérence entre les puissances souscrites et les puissances appelées :
 - Au niveau des postes PT1 et PT2, le dépassement de la puissance souscrite atteint 300%.
 - Au niveau des poste PT3 et PT4, la puissance souscrite est relativement surestimée.
- Les valeurs des facteurs de charge sont comprises entre 0,32 et 0,55, cela renseigne sur la possibilité de contrôle de la puissance appelée afin de diminuer le coût unitaire moyen du kwh.

- Les facteurs de puissance enregistrés au niveau de PT3 et PT4 sont généralement mauvais, cette situation s'explique par l'énergie réactive consommée et les harmoniques générés par les portiques qui sont équipés d'un nombre important de charges consommatrices de l'énergie réactive (moteurs asynchrones) et des charges non linéaires (convertisseurs statiques à base de diodes et de thyristors).
- L'analyse de la consommation globale montre que les équipements de manutention et l'éclairage sont les plus dominants, c'est pour cette raison qu'ils méritent un grand intérêt et une étude approfondie pour améliorer leurs efficacités.
- Les engins de manutention consomment plus de 80% de l'énergie réactive consommée au **TCE**.
- Selon la courbe montrant la tendance de la consommation électrique des portiques en fonction du nombre des boîtes manutentionnées (cf. fig.12), on conclut que les portiques consomment 40 000 kwh par mois même lorsqu'ils ne sont pas en exploitation, c'est l'équivalent de 200 kwh par jour par portique. Cette situation est due aux charges qui fonctionnent même en l'absence de production (Eclairage, ascenseur, clim).
- Même constat pour la consommation globale du **TCE**, elle est aux environs de 150 000 kwh par mois à production nulle. Là, l'éclairage du terminal représente une part importante.
- Les pénalités représentent une partie significative de la facture électrique globale, elles sont causées essentiellement par :
 - le dépassement des puissances souscrites au niveau des postes PT1 et PT2,
 - les mauvais facteurs de puissance au niveau des postes PT3 et PT4.

IV. Anomalies relevées et recommandations

Le traitement et l'analyse des données collectées met directement en évidence les déperditions d'énergie donnant lieu à des mesures correctives pour améliorer les performances et la gestion d'énergie et donc à des économies.

Sur la base des constatations précédentes, on peut d'ores et déjà émettre les recommandations et propositions :

- La méthode de calcul des différents éléments de la facture doit être explicitée par le distributeur qui est l'ANP et les coefficients de calculs spécifiés. En effet plusieurs

erreurs ont été relevées dans les factures et qui pénalisent **Marsa Maroc**. Le distributeur et le client doivent disposer de la même procédure pour le relevé des compteurs et le calcul du montant des factures.

- Les puissances souscrites sont à revoir en tenant compte des puissances appelées pour éviter les pénalités de dépassement.
- Le recours à un seul point de comptage (en tête de boucle) permettra de :
 - réduire la puissance globale à souscrire au **TCE**,
 - relever le facteur de puissance global et réduire les pénalités,
 - réduire la charge de traitement des factures (une seule facture au lieu de quatre),
 - placer un compteur récupéré en parallèle avec celui servant de comptage à l'ANP pour un comptage contradictoire,
- L'opération de regroupement de compteurs ne pourrait pas suffire à elle seule pour relever le facteur de puissance à une valeur supérieure à 0,8. Il y aura lieu de prévoir un renforcement des batteries de compensation voire envisager la mise en place d'un filtrage d'harmoniques.
- Le relèvement du facteur de puissance recommandé va générer une économie sans compter l'impact sur la puissance appelée qui en sera réduite et par conséquent la puissance à souscrire sera moindre.
- Une politique adaptée de gestion d'énergie doit être mise en œuvre pour éviter des frais d'appel de puissance trop élevés par la gestion des pics de consommation.
- Le remplacement des projecteurs et des lampes existants par d'autres moins consommateurs d'énergie est recommandé.
- La mise en place des réducteurs de tension pour commander ces projecteurs et des détecteurs de présence pour ne les alimenter qu'en cas de besoin permettra de diminuer encore plus la consommation.
- Etant donné que les moteurs électriques consomment plus de 65% de l'énergie électrique nécessaire pour le fonctionnement d'un portique à conteneurs mis en exploitation, l'utilisation des technologies de moteurs à haut rendement reste une solution à privilégier lors de remplacement de moteurs.
- Par une identification des besoins de chaque zone du **TCE**, et une analyse de la qualité de l'éclairage qu'il faut mettre en place, il est possible de minimiser les besoins énergétiques consacrés à ce poste consommateur.

- Recourir aux énergies renouvelables pour soulager la demande de l'électricité est à étudier : Le photovoltaïque s'annonce prometteur vu le niveau haut d'ensoleillement et la disponibilité des surfaces libres orientées au soleil.

Chapitre 3 :

Recommandations pour la réduction de la facture électrique au TCE

La réduction de la facture électrique s'articule sur l'application des mesures liées à la fois, à la facturation et aux équipements.

I. Mesures d'économie d'énergie liées à la facturation

I.1 Composition d'une facture

Le montant d'une facture électrique se décompose de 5 éléments distincts :

- **La prime fixe** qui correspond d'une certaine manière au prix de l'abonnement.
- **Le dépassement de la puissance souscrite** qui est le montant facturé lorsque l'appel de puissance dépasse celui défini dans le contrat.
- **Le dépassement en énergie réactive**, est le montant facturé lorsque la tangente de l'angle du déphasage courant tension est inférieure à 0,4.
- **L'énergie consommée** qui correspond au nombre de kwh consommé.
- **L'approvisionnement** qui est une estimation qui couvre les frais d'acheminement de l'énergie et du comptage.

I.2 Eléments optimisables

I.2.1 Puissance souscrite

C'est une puissance contractuelle auprès du distributeur de l'énergie électrique que le client est censé ne pas dépasser, tout dépassement engendre une pénalité.

Le choix de la puissance souscrite optimale est obtenu par un calcul de la redevance minimale issu de l'analyse des factures des 12 derniers mois, en vue de prédire la puissance future à souscrire.

I.2.2 Facteur de puissance

Les termes du contrat avec le distributeur d'électricité imposent que le facteur de puissance (ou le $\cos \varphi$) ait une valeur minimale, à défaut de quoi une pénalité très dissuasive est appliquée dès lors que la valeur devient inférieure à 0,8.

Dans le cas des situations pénalisantes, il faut relever le facteur de puissance à au moins la valeur contractuelle, à cet effet des batteries de condensateurs sont placées aux points adéquats du réseau électrique pour compenser la puissance réactive des charges inductives. En présence d'harmoniques, le filtrage peut s'avérer également nécessaire.

Les bénéfices de la compensation sont [5] :

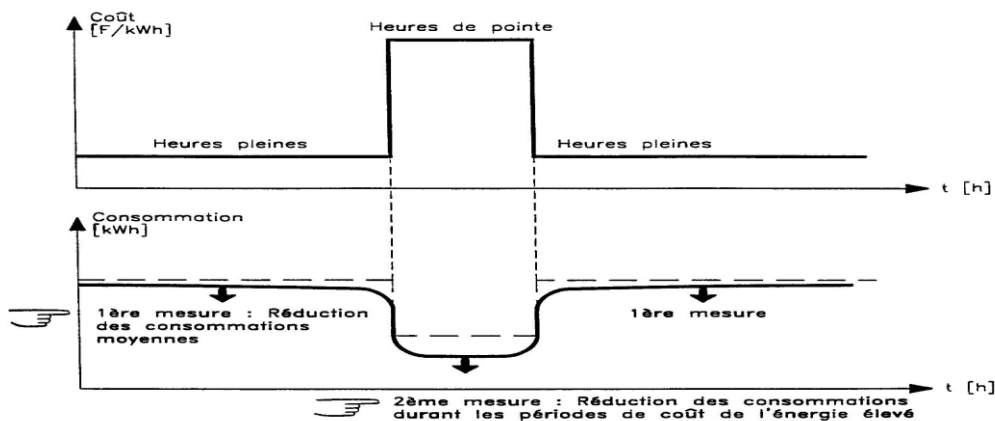
- L'augmentation de la puissance active disponible avec la même installation. On a $P = S \cos(\varphi)$ et pour la même installation, S ne change pas donc si on augmente $\cos \varphi$, P augmente aussi.
- La diminution des pertes d'énergie par effet joule du fait de la diminution du courant véhiculé dans les câbles. En fait, on a $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$ en triphasé d'où $I = P/\sqrt{3}U \cos \varphi$ donc si le $\cos \varphi$ augmente le courant I diminue.
- La réduction de la chute de tension puisqu'une partie du courant réactif ne circule pas dans le réseau d'alimentation.

Le traitement des harmoniques apporte les avantages suivants [6] :

- La contribution à l'amélioration du facteur de puissance.
- Les économies d'énergie électriques consécutives aux réductions des différents types de pertes et réduction des coûts de maintenance.
- La conformité aux normes et standards internationaux.

I.2.3 Gestion des tranches horaires

Les coûts de l'énergie varient selon les heures de la journée, les dépenses d'énergie peuvent être réduites en privilégiant un fonctionnement pendant les périodes tarifaires les moins chères.



II. Mesures liées aux équipements

Ces mesures visent la réduction de la consommation électrique des équipements du TCE, elles concernent les consommateurs suivants :

II.1 Portiques à conteneurs

Les mesures à adopter concernent :

- le mode de fonctionnement des portiques ; je cite par exemple :
 - l'utilisation des spreaders électriques,
 - l'utilisation des moteurs à haut rendement **HEM**,
 - la généralisation de l'utilisation des variateurs de vitesse.
- Le mode d'exploitation; je cite par exemple :
 - L'adoption du cycle double en manutention,
 - la manutention en **TWIN** ou en **TANDEM LIFT**

II.2 L'éclairage

C'est une branche dans laquelle les économies peuvent être réalisées rapidement et avec un coût minimal, les mesures à mettre en œuvre concernent :

- l'utilisation des lampes à faible consommation,
- l'utilisation des variateurs de lumière ou des réducteurs d'énergie pour l'éclairage, afin de réduire la consommation pendant les périodes d'inactivité,
- privilégier l'éclairage naturel dans les hangars et magasins.

II.3 Bâtiments administratifs

Souvent les ordinateurs, imprimantes, photocopieurs... restent allumés ou presque alors qu'ils sont inactifs et des climatiseurs mal réglés ou mal installés, tout cela provoque de nombreux gaspillages qui pourraient être évités.

A cet effet, il est recommandé de :

- éteindre les écrans et unités centrales en partant du bureau,
- privilégier l'utilisation des ordinateurs portables qui consomment 50 à 80 % d'énergie en moins que les postes fixes.
- recourir à l'usage d'une climatisation performante, par :
 - L'utilisation des écrans solaires extérieurs sur les vitrages,
 - le contrôle régulier du filtrage,
 - l'amélioration de l'étanchéité des fenêtres et des portes,
- l'adaptation des niveaux de températures pour éviter le sur-refroidissement.

Chapitre 4 : Etude des améliorations et des solutions proposées

A la lumière du diagnostic présenté dans le chapitre 2 et des recommandations données au chapitre 3, je propose de consacrer ce chapitre à l'étude de solutions d'amélioration.

Ces améliorations concernent les aspects suivants :

- Comptage électrique en tête de boucle.
- Optimisation de la puissance souscrite.
- Gestion des tranches horaires.
- Amélioration du facteur de puissance par la compensation de l'énergie réactive et le filtrage des harmoniques.
- Amélioration de l'efficacité énergétique de l'éclairage.
- Dimensionnement de panneaux photovoltaïque pour une couverture partielle des besoins.
- Mesures d'économie d'énergie liées aux équipements.

Comptage électrique en tête de boucle

La mise en place par **Marsa Maroc** à l'entrée du TCE d'un poste de livraison qui prend en charge la boucle HTA du TCE, a permis de mettre en application la recommandation de regroupement des comptages au poste de livraison.

Le synoptique suivant indique le point d'installation du compteur :

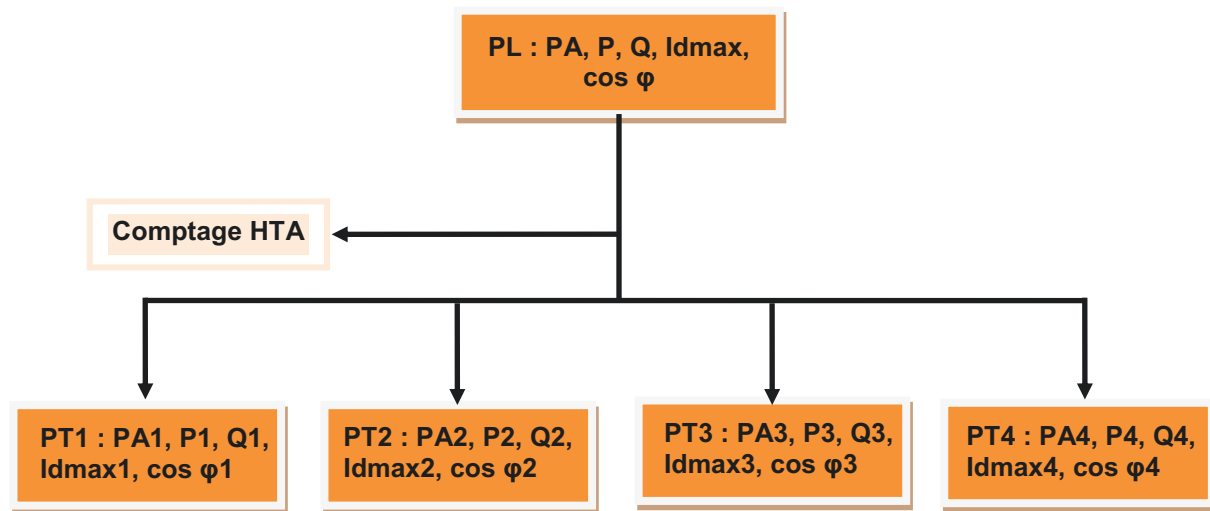


Figure 15: Principe de mise en place du comptage en tête de boucle

Le compteur qui va remplacer les quatre installés aux postes PT1 à PT4 comptabilisera :

- L'énergie active des 4 postes, soit $\sum Ea = Ea1 + Ea2 + Ea3 + Ea4$
- L'énergie réactive des 4 postes, soit $\sum Er = Er1 + Er2 + Er3 + Er4$
- Le **cos φ** déduit des énergies active et réactive comptabilisées :

$$\cos \varphi = \cos\left(\tan^{-1} \frac{\sum Er}{\sum Ea}\right)$$

- La puissance appelée au niveau du poste de livraison qui est nécessairement inférieure à la somme des puissances maximales appelées par chacun des postes ; les max ne se produisant pas au même moment.

$$Pa \text{ (kVA)} = \frac{Id \text{ max}}{\cos \varphi}, \text{ **Id max*** : puissance active maximale (kw) mesurée en 15 mn.}$$

*(Le compteur enregistre les consommations tous les 15 mn. En divisant l'énergie consommée par le temps écoulé (15 minutes), il va déterminer la puissance moyenne appelée durant ce 1/4 d'heure. C'est le maximum de ces puissances moyennes qui servira de base)).

Si le regroupement était opéré dès 2011, la facture au point de livraison porterait les indications suivantes :

(la puissance appelée est approchée par : $PA = \frac{Id_{max1} + Id_{max2} + Id_{max3} + Id_{max4}}{\cos\phi}$)

2011	Ea _{total} (kWh)	Er _{total} (kvarh)	Indice de max (kw)	cos φ	PA globale (kVA)
Janvier					
Février					
Mars					
Avril					
Mai					
Juin					
Juillet					
Août					
Septembre					
Octobre					
Novembre					
Décembre					

Tableau 15: consommations électriques de 2011 en tête de boucle

Commentaires :

Le recours à un seul compteur permet de bénéficier des avantages suivants :

- une seule facture au lieu de 4,
- amélioration du facteur de puissance moyen,
- réduction des puissances maximales appelées.

Optimisation de la puissance souscrite

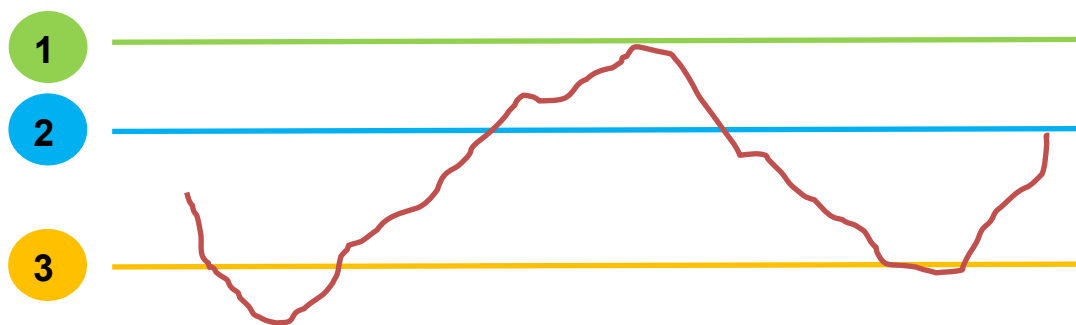
Un nouveau système de comptage signifie un nouveau contrat d'approvisionnement, cela implique le choix d'une puissance souscrite optimisée.

I. Avantages de l'optimisation

Si la puissance souscrite est élevée ou parfois égale à la puissance appelée, il en résulte un coût fixe élevé de redevance de puissance qu'il faut payer. Aussi, si la puissance souscrite est fixée à une faible valeur ou si l'appel de puissance dépasse la valeur de la puissance souscrite, ceci aboutit à une facturation de la redevance de puissance majorée par des pénalités de 50%, c'est une situation qui se révèle coûteuse [7].

Dans tous les cas, il faut choisir une valeur de la puissance souscrite très proche des différentes valeurs des puissances appelées mensuellement.

Pour bien expliquer de quelle manière doit être ajustée la puissance souscrite nous allons nous reposer sur l'illustration suivante:



- 1 Premier cas : la puissance souscrite permet de **couvrir l'ensemble des appels de puissance** enregistrés par un site de production, aucun dépassement n'est par conséquent facturé à l'entreprise.
- 2 Deuxième cas : l'entreprise à **une puissance souscrite légèrement inférieure** à ses besoins, elle paie donc de manière ponctuelle des dépassements à son fournisseur.
- 3 Troisième cas : l'entreprise à une **puissance souscrite inférieure à ses besoins**, alors elle paie régulièrement des dépassements à son fournisseur.

La situation idéale est de trouver un juste équilibre entre le montant de la prime fixe et le montant du dépassement, comme c'est le cas dans la situation numéro 2. C'est l'optimisation de la puissance souscrite.

II. Calcul de la puissance souscrite optimisée pour le TCE

Puisque la correction du facteur de puissance par des solutions de compensation et de filtrage des harmoniques ne permet pas seulement de rester à l'abri des pénalités, mais aussi de réduire la puissance appelée. Donc, et pour tenir compte de ce point, on recalcule les puissances appelées sur la base d'un $\cos \varphi$ égal à 0,95.

On obtient les valeurs suivantes :

2011	Indice de max (kw)	$\cos \varphi$	$PA = \frac{\text{Indice de max (kW)}}{\cos \varphi} \text{ (kVA)}$
Janvier			
Février			
Mars			
Avril			
Mai			
Juin			
Juillet			
Août			
Septembre			
Octobre			
Novembre			
Décembre			

Tableau 16: Puissances appelées après compensation de l'énergie réactive

II.1 Algorithme d'optimisation

La puissance à souscrire est généralement évaluée à partir des puissances appelées enregistrées sur une période de 12 mois.

- Celles-ci sont classées par ordre croissant de 1 à 12
- Pour chacune de ces puissances, considérées comme puissance souscrite, on calcule les redevances et les pénalités

$$PS = P_i \quad (i= 1 \text{ à } 12)$$

On a :

$$C_{Ti} = C_{Ri} + C_{Pi}$$

C_{Ti} le coût total (puissance souscrite + pénalité) associé à $PS = P_i$

C_{Ri} redevance puissance souscrite associée à $PS = P_i$

C_{Pi} pénalité de dépassement puissance souscrite associée à $PS = P_i$

$$C_{Ri} = P_i * R_{as}$$

R_{as} redevance annuelle par kVA souscrit

$$C_{Pi} = \sum_{j=i+1}^{12} (P_j - P_i) * \frac{1}{12} * R_{as} * 1.5$$

$$C_{Pi} = \sum_{j=i+1}^{12} a * P_j - \sum_{j=i+1}^{12} a * P_i \quad \text{avec } (a = \frac{1.5}{12} R_{as})$$

$$C_{Pi} = (a * \sum_{j=1}^{12} P_j) - (a * \sum_{j=1}^i P_j) - (12 - i) * a * P_i$$

On pose :

$$cum_i = \sum_{j=1}^i P_j$$

Ci-dessous un tableau contenant les paramètres nécessaires pour déterminer les puissances souscrites optimisées, les redevances et les pénalités.

Ps	cum _i	A	B _i	12 – i	K _i	C _i	C _{Pi}	C _{Ri}	C _{Ti}
P ₁	P ₁	A	B ₁	11	K ₁	C ₁	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₂	P ₁ + P ₂	A	B ₂	10	K ₂	C ₂	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₃	P ₁ + P ₂ + P ₃	A	B ₃	9	K ₃	C ₃	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₄		A	B ₄	8	K ₄	C ₄	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₅		A	B ₅	7	K ₅	C ₅	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₆		A	B ₆	6	K ₆	C ₆	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₇		A	B ₇	5	K ₇	C ₇	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₈		A	B ₈	4	K ₈	C ₈	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₉		A	B ₉	3	K ₉	C ₉	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₁₀		A	B ₁₀	2	K ₁₀	C ₁₀	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₁₁		A	B ₁₁	1	K ₁₁	C ₁₁	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}
P ₁₂	P ₁ + ... + P ₁₂	A	B ₁₂	0	K ₁₂	C ₁₂	A – B _i – C _i	P _i * Ras	C _{Pi} + C _{Ri}

Tableau 17: Algorithme de calcul de la puissance souscrite optimisée

Avec :

$$A = a * cum_{12} = a * \sum_{j=1}^{12} P_j$$

$$B_i = a * cum_i = a * \sum_{j=1}^i P_j$$

$$C_i = k_i * a * P_i = (12 - i) * a * P_i$$

$$C_{Ti} = C_{Pi} + C_{Ri} = (A - B_i - C_i) + P_i * R_{as}$$

II.2 Résultats obtenus

→ Redevance puissance souscrite **RPS** :

$$RP = 12 * PS * PF \quad \text{avec } PF = 32,64833 \text{ DHS}$$

→ Redevance de dépassement de la puissance souscrite **RDPS** :

$$RDPS = \sum ((PA_i - PS) * 1,5 * PF$$

En appliquant l'algorithme d'optimisation de la puissance souscrite, on obtient les valeurs suivantes :

PA (kVA)	RPS (DHS)	RDPS (DHS)	RPS+RDPS (DHS)

Tableau 18: Cout de puissance souscrite en fonction des puissances appelées

La puissance optimisée à souscrire est **kVA**.

Gestion des tranches horaires

Plusieurs actions peuvent être envisagées à ce niveau :

- La mise en place d'un système de délestage qui permet d'interdire ou de réduire l'alimentation des installations électriques pendant des périodes tarifaires où le coût de l'énergie est le plus élevé (heures pleines et/ou heures de pointe).
- Mettre en œuvre d'un système pour encourager les clients à demander les prestations pendant les tranches horaires les moins chères, étant donné que le **TCE** fonctionne 24h/24.

La solution que je propose est de mettre en place un système intelligent de délestage en divisant le terminal en zones ayant le même profil d'occupation ou d'usage, au niveau de chaque zone ou sous zone on installe un délesteur qui peut agir directement sur les contacteurs alimentant les équipements pouvant être délestés.

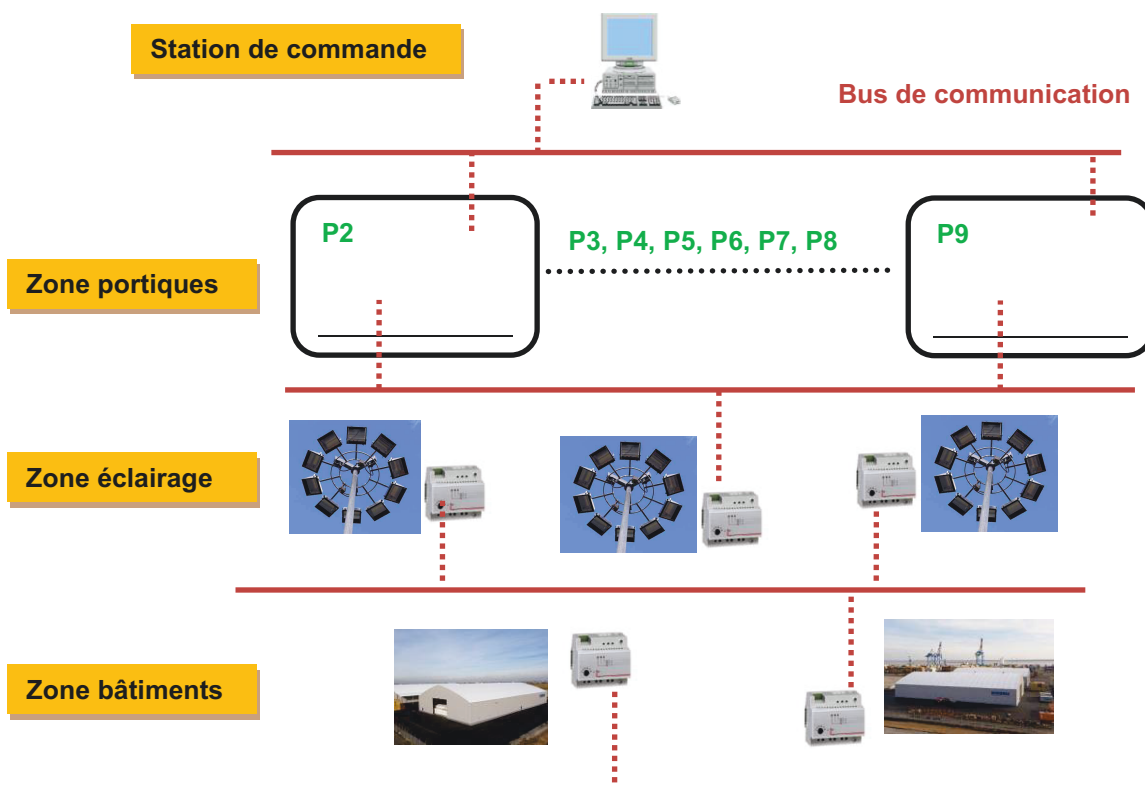


Figure 16: Synoptique de la mise en place d'un système de délestage globale au TCE

L'ensemble des délesteurs doivent communiquer avec une station de commande (**pc, automate**) via un réseau (**Ethernet, modbus ...**), la station de commande agit en fonction d'un ordre de priorité décroissant préprogrammé.

Ce système a pour rôle d'interdire ou de réduire l'alimentation des installations électriques, ou encore de basculer celles-ci sur un réseau électrique interne pendant des périodes tarifaires où le coût de l'énergie est le plus élevé (heures pleines et/ou heures de pointe).

Compensation de l'énergie réactive et filtrage des harmoniques

I. Généralités et rappels essentiels

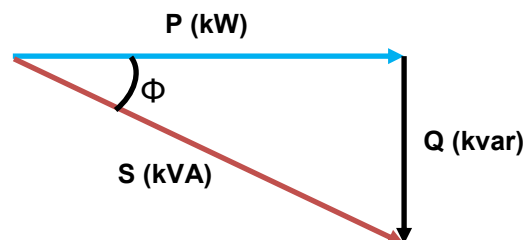
I.1 Energie réactive

Toute machine électrique utilisant le courant alternatif (moteur, transformateur) met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive.

L'énergie active consommée (kwh) résulte de la puissance active P (kw) des récepteurs, elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes).

L'énergie réactive consommée (kvarh) sert essentiellement à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques, elle correspond à la puissance réactive Q (kvar) des récepteurs [8].

L'énergie apparente (kvah) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes, elle correspond à la puissance apparente S (kVA) des récepteurs.



On définit ainsi:

- la puissance apparente : $S = UI$ (kVA),
- la puissance active : $P = UI \cdot \cos \phi$ (kW),
- la puissance réactive : $Q = UI \cdot \sin \phi$ (kvar).

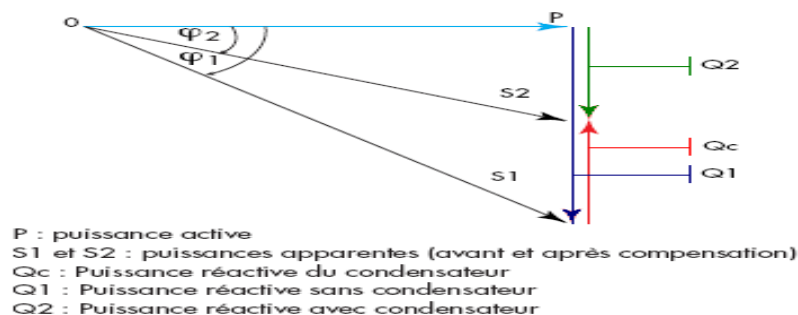


Figure 17: Influence de l'énergie réactive sur la puissance installée

La circulation de l'énergie réactive a des incidences importantes. En effet, pour une même puissance active P il faut fournir d'autant plus de puissance apparente et donc de courant que la puissance réactive est importante (cf. fig.16).

Ainsi, du fait d'un courant appelé plus important la circulation de l'énergie réactive sur les réseaux de distribution entraîne :

- des surcharges au niveau des transformateurs,
- l'échauffement des câbles d'alimentation,
- des pertes supplémentaires,
- des chutes de tension importantes.

Pour les raisons évoquées ci-dessus, il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle "**Compensation de l'énergie réactive**".

La compensation d'une installation consiste à installer une batterie de condensateurs, dont la puissance est calculée selon la méthode suivante [5]:

Soit :

φ_1 l'angle de déphasage actuel de l'installation

φ_2 l'angle de déphasage cible après compensation

On a:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = P \cdot \tan \varphi_1 - P \cdot \tan \varphi_2$$

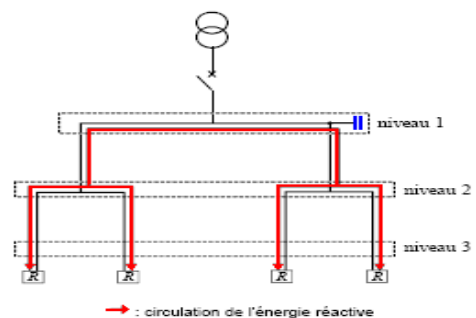
D'où:

$$Q_C = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

La compensation se fait selon trois modes :

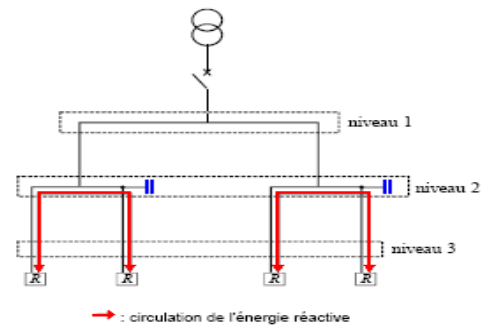
❖ Compensation globale

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation, elle reste en service de façon permanente. Ce type de compensation convient lorsque la charge est régulière [8].



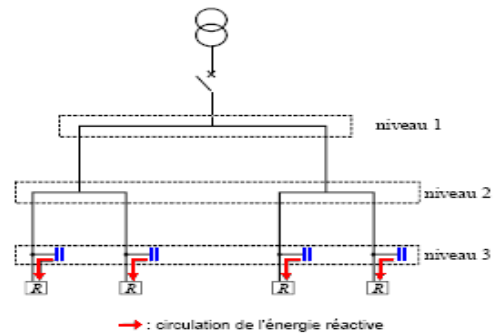
❖ Compensation par secteur

La batterie est raccordée au tableau de distribution et fournit l'énergie réactive demandée par un secteur de l'installation, ce type de compensation est conseillé lorsque l'installation est étendue et comporte des secteurs à forte consommation d'énergie réactive.



❖ Compensation individuelle

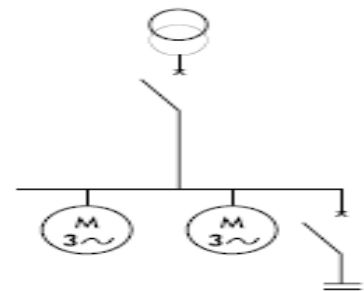
La batterie est raccordée directement aux bornes du récepteur, cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins. C'est le type de compensation qui offre le plus d'avantages mais qui est le plus coûteux.



Il existe deux types ou systèmes de compensation :

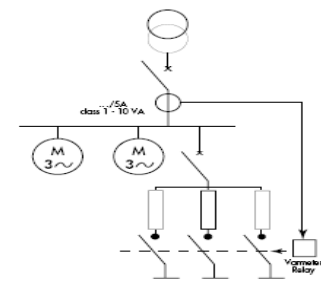
❖ Compensation fixe

La puissance réactive fournie par la batterie est constante quelles que soient les variations du facteur de puissance et de la charge des récepteurs, ce type de compensation est utilisé lorsque la puissance réactive est faible (<15 % de la puissance du transformateur) et la charge relativement stable.



❖ Compensation automatique

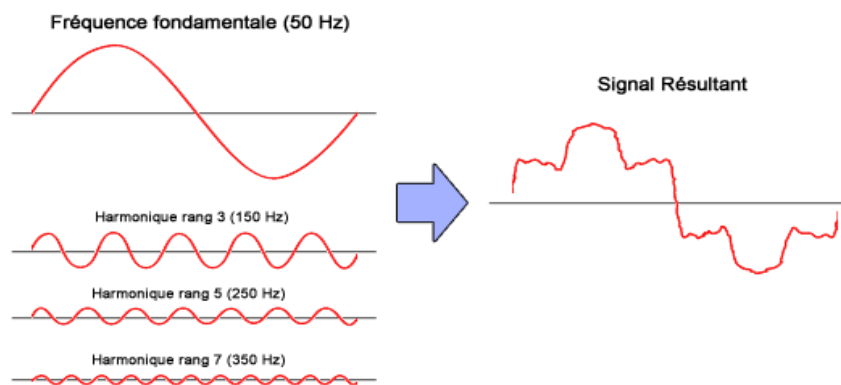
La puissance réactive fournie par la batterie est modulable en fonction des variations de la consommation d'énergie réactive de l'installation. La modulation se fait en gradins avec régulateur (ou batteries automatiques), l'enclenchement et le déclenchement est piloté par un relais varométrique.



I.2 Les harmoniques

Les charges dites déformantes appellent du réseau électrique un courant non sinusoïdal possédant un contenu harmonique, ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau, ils peuvent lorsqu'ils sont importants en amplitude créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements.

Les courants harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'un courant électrique périodique, les harmoniques ont une fréquence multiple de la fréquence fondamentale [6] [9].



Un signal périodique non sinusoïdal peut être représenté selon Fourier sous la forme suivante :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

- Y_0 : valeur de la composante continue,
- Y_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n ,
- ω : pulsation de la fréquence du fondamental,
- φ_n : déphasage de la composante harmonique de rang n .

Les indicateurs appropriés permettant d'évaluer la distorsion harmonique des ondes de tension et de courant, sont :

- **Valeur efficace d'une grandeur alternative non sinusoïdale**

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}$$

▪ Taux de distorsion

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative.

$$THD(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

▪ Taux individuel d'harmonique

Cette grandeur représente le rapport de la valeur efficace d'un harmonique par rapport à la valeur efficace du fondamental (Y_1), selon la définition usuelle ou bien par rapport à la valeur efficace de la grandeur alternative (Y_{eff}).

$$H_n\% = 100 \frac{Y_n}{Y_1}$$

▪ Facteur crête

$$K = \frac{I_M}{I_{eff}} \quad \text{ou} \quad \frac{U_M}{U_{eff}}$$

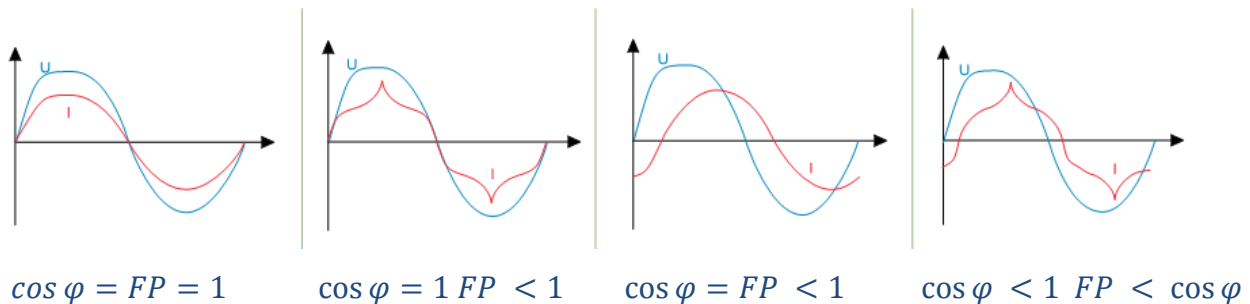
I_M, U_M valeurs crête en courant et en tension, I_{eff}, U_{eff} valeurs efficaces en courant et en tension.

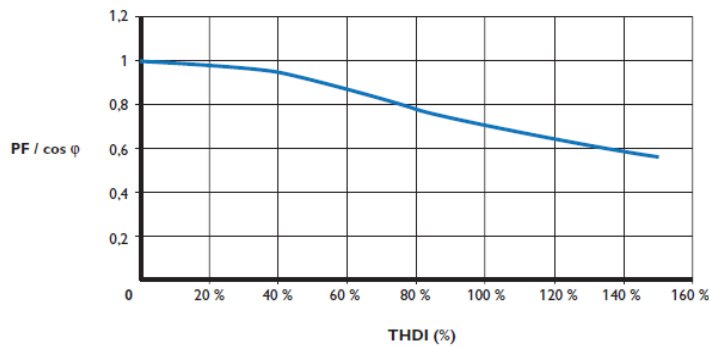
▪ Spectre de fréquence

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental.

L'évaluation de ces indicateurs permet de quantifier le niveau de pollution harmonique :

- Une première indication de présence significative d'harmoniques peut être un facteur de puissance "PF" mesuré différent du $\cos \varphi$ (**PF < $\cos \varphi$**).





Variation de $\frac{FP}{\cos \varphi}$ selon THD-I

avec THD-U = 0 %

$$FP \approx \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD-I^2}}$$

En présence de charges non linéaires, l'expression des puissances devient $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ avec **D** est la puissance déformante [6].

- un facteur de crête très élevé signifie des surintensités ponctuelles importantes. Ces surintensités détectées par les dispositifs de protections peuvent être à l'origine de déclenchements intempestifs.
- le THD en tension caractérise la déformation de l'onde de tension le THD en courant influence sur le facteur de puissance, plus il augmente plus le facteur de puissance diminue. Selon le THD, des interprétations peuvent être tirées :
 - une valeur de THD inférieure à 5 % est considérée comme normale, aucun dysfonctionnement n'est à craindre.
 - une valeur de THD comprise entre 5 et 8 % révèle une pollution harmonique significative, quelques dysfonctionnements sont possibles.
 - une valeur de THD supérieure à 8 % révèle une pollution harmonique importante, une analyse approfondie est nécessaire.

Le tableau suivant illustre l'allure typique des spectres de courant harmonique émis par quelques charges non linéaires [8].

	Exemples d'appareils	Contenu harmonique typique
Redresseurs triphasés capacitifs	- machine asynchrone à vitesse variable.	

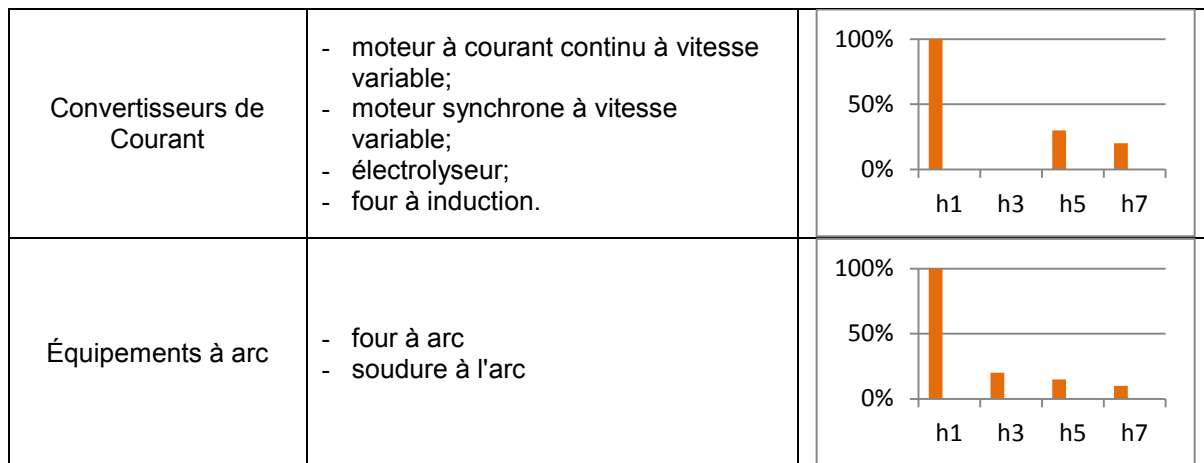
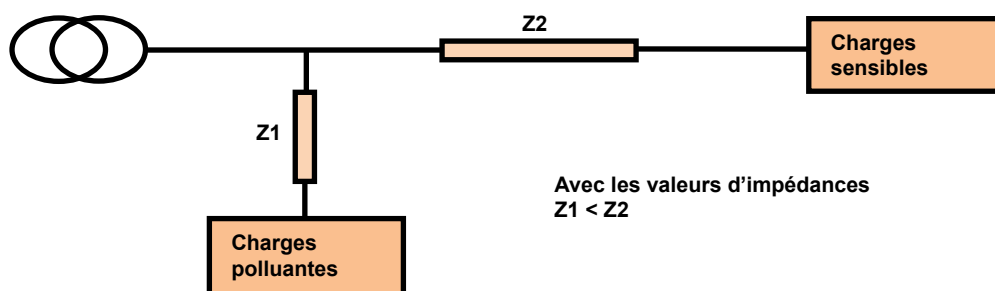


Tableau 19: Spectres de courant harmonique émis par les équipements perturbateurs

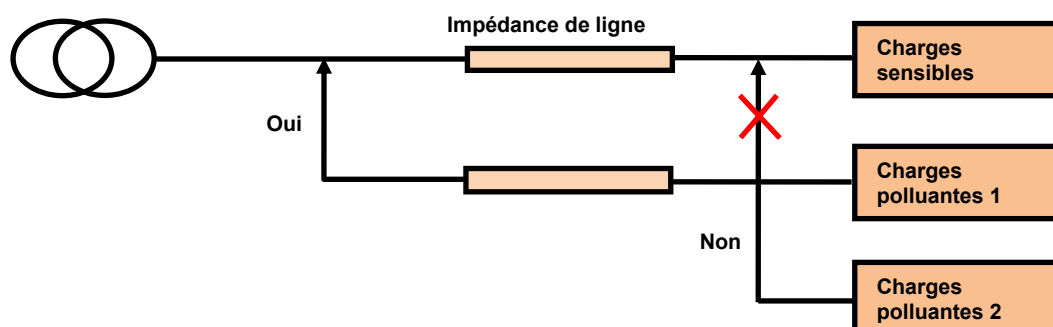
Les harmoniques peuvent provoquer l'échauffement des transformateurs, câbles, moteurs, générateurs et condensateurs raccordés à la même alimentation que les dispositifs générateurs d'harmoniques. Les éclairages se mettent à papilloter, les disjoncteurs peuvent déclencher et les instruments de mesure donnent des valeurs erronées [10] [9].

Les solutions pour atténuer les effets des harmoniques sont de trois natures différentes :

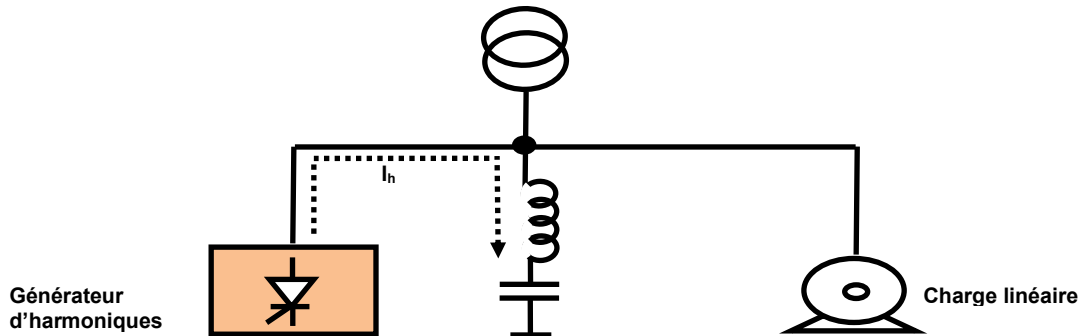
- Adaptation de l'installation, en observant les règles suivantes :
 - positionnement des charges polluantes en amont du réseau



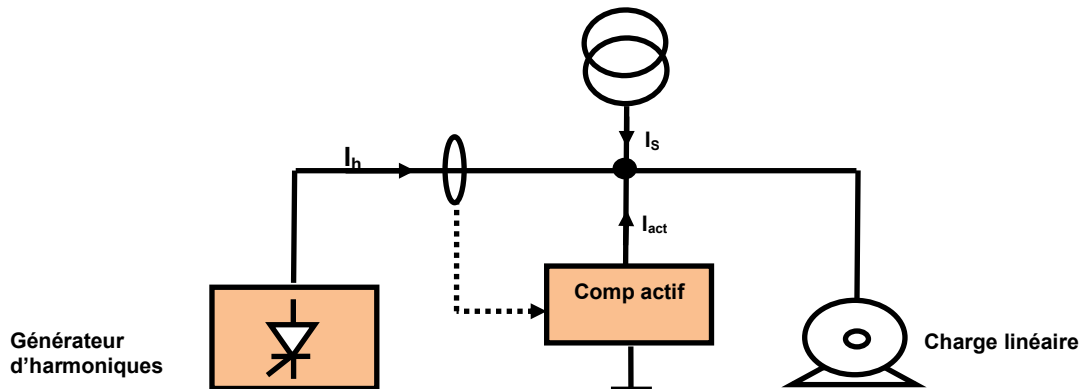
- regroupement des charges polluantes (pour tendre, par foisonnement, à compenser entre eux les effets indésirables) :



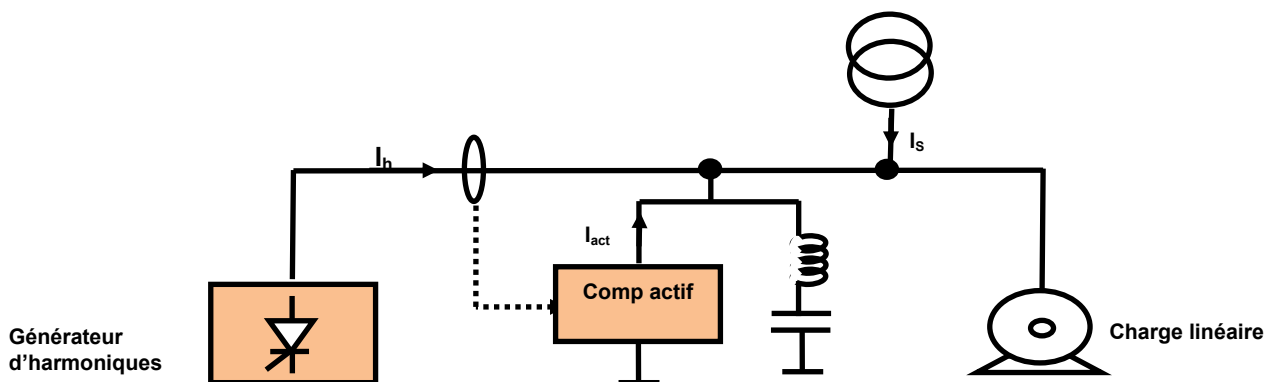
- choix d'un schéma de liaison à la terre adapté (le régime TNS étant conseillé).
- Utilisation de dispositifs particuliers dans l'alimentation (inductances, transformateurs à couplages particuliers, adaptés à la pollution),
- Utilisation de dispositifs de filtrage dans le cas où les actions préventives décrites ci-dessus sont insuffisantes. Ces filtres sont de 3 types :
 - **le filtre passif**, qui consiste à placer un circuit résonant LC accordé sur la fréquence de l'harmonique à piéger en parallèle avec la charge polluante.



- le filtre actif qui consiste à créer des courants opposés aux courants harmoniques de la charge, ce type autorise le filtrage des harmoniques sur une large bande de fréquence avec toutefois une puissance harmonique limitée :



- le filtre hybride réunissant l'ensemble des performances des filtres passifs et actifs:



Ce type de filtrage possède des caractéristiques spécifiques :

- combine les avantages des filtres actifs et des filtres passifs,
- permet de filtrer des courants harmoniques de valeurs importantes (en général les rangs 5,...)
- assure également la compensation d'énergie réactive (permettant si besoin une régulation automatique par gradins),
- assure le filtrage global des harmoniques des rangs 2 à 25.

Le filtrage peut se faire soit de façon individuelle en plaçant aux bornes de chaque générateur d'harmonique un filtre de faible puissance en prenant les précautions pour éviter les interactions des filtres de même rang, soit en raccordant un seul ensemble de filtrage au jeu de barres principal.

Lorsque les générateurs d'harmoniques sont alimentés en BT par plusieurs transformateurs MT/BT, la mise en place des filtres sur la moyenne tension réduit le taux de distorsion en MT et au niveau de tension supérieur mais n'agit pas sur la partie BT, il peut donc être nécessaire de placer les filtres en aval de chaque transformateur MT/BT où l'on relève ces perturbations.

II. Analyse harmonique du réseau de distribution du TCE

II.1 Outil d'analyse et de simulation

On se propose de dimensionner et mettre en œuvre un système de filtrage permettant de filtrer les composantes réactives et les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges polluantes.

Dans cette étude on utilise le logiciel **ETAP** (*Electrical Transient Analyzer Program*) (cf. annexe) qui permet de [11] :

- évaluer les amplitudes des courants harmoniques circulant dans chaque branche et les taux de distorsion harmoniques des tensions en chaque point du réseau,
- proposer et valider des solutions de filtrage des harmoniques permettant de dépolluer le réseau.

Ci-dessous les étapes à suivre pour faire l'analyse.

- **Etape 1:** Collecte des données nécessaires.
- **Etape 2:** Identifier les charges linéaires et non linéaires.
- **Etape 3:** Préparer le SLD (single line diagram).
- **Etape 4:** Démarrer la répartition de charge **load flow**.
- **Etape 5:** Faire l'analyse harmonique, vérifier les taux de distorsion.
- **Etape 6:** Dimensionner le filtrage si les THD ne sont pas dans les normes,.
- **Etape 7:** Ajouter les filtres et revérifier les niveaux de distorsion.

Le système de distribution électrique du **TCE** est présenté ci-dessous (cf. fig.17.18), les différents types des charges linéaires et non linéaires connectées au réseau sont détaillés dans le chapitre **Audit électrique**.

On rappelle que le réseau de distribution du **TCE** est alimenté via un poste de livraison à partir d'un transformateur **10 MVA 20 kV/5.5 kV**. Il a une architecture en boucle ouverte et alimente en HTA 5.5 kV huit portiques dont la puissance installée sur chacun est de l'ordre de **1600 kVA**, les autres équipements et installations sont alimentés en BT via des transformateurs HTA/BT dispatchés sur 4 postes.

Pour que la simulation soit plus précise, on suppose que :

- 4 portiques à conteneurs sont affectés,
- tous les projecteurs de l'éclairage public sont allumés,
- 30% des prises frigo sont sous branchement,
- les bâtiments (ateliers, administration, magasins) sont occupés par les employés,
- les unités de compensation de l'énergie réactive installées dans les PT sont hors circuit.

Le paramétrage de la simulation prend en considération les points suivants :

- Les convertisseurs **AC/DC** et **AC/AC** alimentant les moteurs d'entraînement sont supposés travailler en continu.
- Les angles d'amorçage des thyristors sont paramétrés selon le régime de fonctionnement sélectionné.

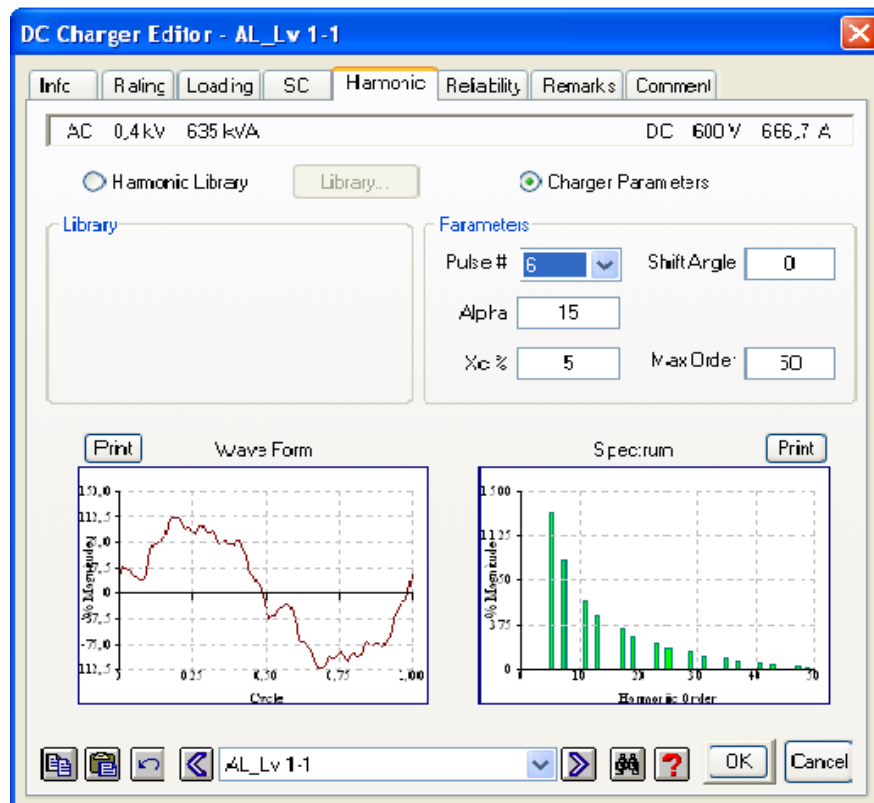


Figure 19: Paramétrage de l'angle d'amorçage des thyristors

- Le paramétrage des facteurs de puissance doit tenir compte des angles d'amorçage des thyristors choisis précédemment.

II.2 Résultats de l'analyse sans filtrage

- Répartition des charges
- Analyse harmonique du réseau
- Analyse harmonique du portique

PT	Bus	P (kw)	Q (kvar)
PL	B_TR_aux		
PT1	B_TR 1_1		
PT2	B_TR 1_2		
	B_TR 2_2		
	B_TR 3_2		
PT3	B_TR 1_3		
	B_TR 2_3		
	P3		

Figure 20: Analyse harmonique du système de distribution du portique P3

	P5		
PT4	B_TR 1_4		
	B_TR 2_4		
	P8		
	P9		

Tableau 20: Ecoulement de puissance dans le réseau de distribution

PT	Bus	V5 %	V7 %	V11 %	V13 %	VTHD %
PL	B_TR_aux					
PT1	B_TR 1_1					
PT2	B_TR 1_2					
	B_TR 2_2					
	B_TR 3_2					
PT3	B_TR 1_3					
	B_TR 2_3					
PT4	B_TR 1_4					
	B_TR 2_4					

Tableau 21: Taux de distorsion individuelle et globale des tensions

PT	Bus	I5%	I7 %	I11 %	I13 %	ITHD %
PL	B_TR_aux					
PT1	B_TR 1_1					
PT2	B_TR 1_2					
	B_TR 2_2					
	B_TR 3_2					
PT3	B_TR 1_3					
	B_TR 2_3					
PT4	B_TR 1_4					
	B_TR 2_4					

Tableau 22: Taux de distorsion individuelle et globale des courants

Portique	I5 %	I7 %	I11 %	I13 %	ITHD %
P3					
P5					
P8					
P9					

Tableau 23: Taux de distorsion des courants dans les lignes des portiques

II.3 Normes et réglementations

Ces normes spécifient les limites de distorsion en tension que les fournisseurs doivent respecter ainsi que les limites de distorsion en courant que les usagers avec leurs charges polluantes, doivent respecter [9].

Rangs impairs		Rangs multiples de 3		Rangs pairs	
rangs	Taux (%)	Rangs	Taux (%)	rangs	Taux (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3*25/h$				

Tableau 24: Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques (*norme CEI 61000-2-2*)

Distorsion maximale du courant harmonique en pourcentage de IL						
Ordre harmonique individuel (harmoniques impairs)						
ISC/IL	11	$11 < n < 17$	$17 < n < 23$	$23 < n < 35$	$35 < n$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Les harmoniques pairs sont limités à 25% des limites des harmoniques impairs définis ci-dessus IL : Demande maximale du courant de charge. ISC : Courant de court-circuit maximal. TDD : Taux de distorsion global du courant.						

Tableau 25: Limites de distorsion de courant pour les systèmes de distribution (120 V à 69 000 V)

II.4 Interprétation des résultats d'analyse

Les résultats montrent que les limites permises sont excédées, les ordres les plus saillants sont le 5th, 7th et 11th.

Les THD Tension et Courant sont supérieurs aux valeurs tolérées par la norme, cela peut

générer une forte pollution et des dysfonctionnements de l'installation.

La répartition des charges montre que les batteries de condensateurs installées assurent une bonne compensation de l'énergie réactive au niveau des postes BT, sauf celles des portiques où il y'a une consommation importante de l'énergie réactive.

Même si de faible puissance, les lampes fluorescents et les ordinateurs appareils installés en très grand nombre ont des conséquences très importantes sur les niveaux d'harmoniques de rang 3, 5, 7, 11 et 13 qui apparaissent sur le réseau.

Les valeurs enregistrées de la consommation d'énergie réactive ainsi que le taux de distorsion harmonique sur le portique montre la nécessité d'une compensation de cette énergie et une atténuation de ce taux. Les paramètres des filtres dimensionnés à l'aide du logiciel ETAP :

PT	Bus	H5	H7
PT1	B_TR 1_1		
PT2	B_TR 1_2		
PT3	B_TR 2_3		
PT4	B_TR 1_4		

Tableau 26: Paramètres des filtres à installer au niveau des bus BT

Portique	H5	H7	H11	H13
P3				
P5				
P8				
P9				

Tableau 27: Paramètres des filtres à installer sur les portiques

II.5 Résultats d'analyse avec filtrage

PT	Bus	P (kw)	Q (kvar)
----	-----	--------	----------

PL	B_TR_aux		
PT1	B_TR 1_1		
PT2	B_TR 1_2		
	B_TR 2_2		
	B_TR 3_2		
PT3	B_TR 1_3		
	B_TR 2_3		
	P3		
	P5		
PT4	B_TR 1_4		
	B_TR 2_4		
	P8		
	P9		

Tableau 28: Power Flow du réseau de distribution au TCE après filtrage

PT	Bus	V5 %	V7 %	V11 %	V13 %	VTHD %
PL	B_TR_aux					
PT1	B_TR 1_1					
PT2	B_TR 1_2					
	B_TR 2_2					
	B_TR 3_2					
PT3	B_TR 1_3					
	B_TR 2_3					
PT4	B_TR 1_4					
	B_TR 2_4					

Tableau 29: Taux de distorsion individuelle et globale des tensions après filtrage

PT	Bus	I5 %	I7 %	I11 %	I13 %	ITHD %
PL	B_TR_aux					
PT1	B_TR 1_1					
PT2	B_TR 1_2					
	B_TR 2_2					
	B_TR 3_2					
PT3	B_TR 1_3					
	B_TR 2_3					
PT4	B_TR 1_4					
	B_TR 2_4					

Tableau 30: Taux de distorsion individuelle et globale des courants après filtrage

Portique	I5 %	I7 %	I11 %	I13 %	ITHD %
P3					
P5					
P8					
P9					

Tableau 31: Taux de distorsion des courants des portiques après filtrage

En effet, après rajout des filtres passifs d'ordres 5th, 7th & 11th, les normes standards ont été respectées et le problème de la pollution harmonique est résolu.

Les THD des tensions et des courants au niveau des bus basse tension se sont améliorés.

AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE L'ECLAIRAGE

I. Généralités

I.1 Types d'éclairage

Les appareils d'éclairage utilisés dans les installations du **TCE** sont de différents types:

Type d'éclairage	Puissance unitaire (w)	Nombre d'unités	Puissance installée (w)
Tubes fluorescents			
Lampes incandescentes			
Lampe HPS			
Lampe à vapeur de mercure			

I.2 Paramètres déterminant dans le choix des lampes

- **Flux lumineux** : C'est la puissance lumineuse émise par une lampe, exprimée en lumens (lm). Il permet de comparer l'efficacité lumineuse des différentes lampes, exprimée en lumens émis par watt de puissance électrique consommée en (lm/W).
- **L'efficacité lumineuse des lampes** : On évalue la qualité énergétique d'une lampe par son efficacité lumineuse (en lm/W) définie comme le rapport du flux lumineux par la puissance électrique absorbée. A partir des catalogues de fournisseurs, il est possible de connaître exactement l'efficacité lumineuse d'une lampe.

L'ambiance lumineuse ressentie par les personnes dépend de deux paramètres indépendants [12] :

- **Indice de rendu des couleurs IRC**: c'est la capacité d'une lampe à restituer correctement les couleurs présentes dans l'environnement (parois du local, objets, personnes, affiches, ...). L'IRC est compris entre 0 et 100, 100 étant l'IRC de la lumière naturelle qui restitue toutes les nuances de couleur et 0 étant l'absence de

couleur reconnaissable. Une différence de 5 points sera perceptible par l'œil humain.

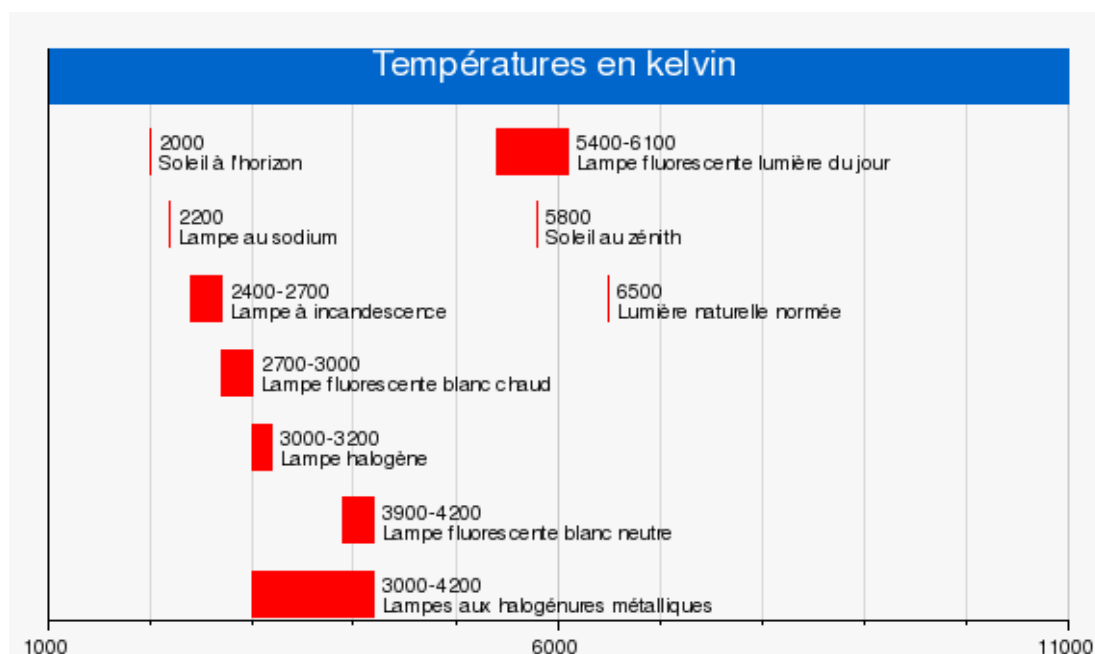


IRC = 100



IRC=25

- **Température de couleur (exprimée en Kelvins)** : cela représente la couleur de la lumière émise par une lampe. On parlera généralement de teinte chaude (température de couleur $< 3\,000\text{ K}$) ou froide (température de couleur $> 3\,000\text{ K}$). La couleur apparente de la source a des effets psychologiques agréables ou désagréables mais n'influence nullement les performances visuelles.



- **La durée de vie moyenne** d'un lot de lampes est le nombre d'heures pendant lesquelles ces lampes ont fonctionné jusqu'au moment où 50 % d'entre elles ne fonctionnent plus.
- **La durée de vie utile** d'un lot de lampes est le nombre d'heures après lequel elles n'émettent plus que 80 % du flux lumineux d'origine. La perte de 20 % du flux lumineux provient d'une part de la diminution progressive du flux des lampes et d'autre part de l'arrêt de fonctionnement d'un certain nombre de lampes.

II. Actions pour un éclairage performant en énergie

Plusieurs techniques ou solutions peuvent être mises en œuvre afin de réaliser l'économie souhaitée au niveau de ce poste consommateur [13].

II.1 Actions au niveau des bâtiments

- **Remplacement des sources de lumière non performantes**

Le remplacement des lampes à incandescences par les lampes fluorescentes normales ou compactes doit être la première action à étudier dans tout établissement où les lampes à incandescences sont encore utilisées.

- **Les tubes fluorescents performants (T5)**

Les tubes fluorescents de type T8 sont le standard actuel, le plus vendu et donc le moins cher. Une nouvelle gamme de tubes fluorescents nommés tubes T5 a été introduite, ils consomment environ 7% de moins que les tubes T8 pour une quantité de lumière équivalente (par exemple 64 lm/W pour un tube T8 de 18W contre 96lm/W pour son équivalent T5 de 14W). De plus, ils contiennent moins de mercure que les tubes T8 standards.

Enfin leur durée de vie est environ deux fois plus longue que celle des tubes T8 standards ce qui permet un changement moins fréquent. Cependant, ils sont sensiblement plus onéreux.

- **Les ballasts électroniques**

Le ballast sert à l'amorçage de l'arc des tubes fluorescents. Il en existe deux types, Ferromagnétique (standard ou faibles pertes) et électronique. La plupart des luminaires actuels sont équipés de ballasts ferromagnétiques. Le ballast électronique est pourtant plus performant : il consomme moins et augmente l'intensité lumineuse. Par exemple, le remplacement d'un ballast ferromagnétique par un ballast électronique sur un luminaire 2x58W permet une économie d'énergie d'environ 25%, une amélioration de la qualité de l'éclairage (démarrage rapide, absence de scintillement...) et un allongement de la durée de vie des tubes. Cependant, il est actuellement 3 à 4 fois plus cher à l'achat qu'un ballast standard.

▪ Les luminaires

Afin d'améliorer les performances d'un luminaire, il doit être muni d'un réflecteur afin d'éviter le rayonnement dans toutes les directions et concentrer donc le flux lumineux dans la zone désirée. S'il est muni d'un film d'argent, il permet une réflexion de 95% contre 78-90% pour un réflecteur en aluminium grand brillant et 60-88% pour un réflecteur en acier prélaqué blanc neuf. Le luminaire doit aussi être muni d'une grille de défilement dont le rôle est d'éviter l'éblouissement.

Le rendement des luminaires varie de 45 à 75%, induisant un écart de consommation de 40% entre les modèles les meilleurs et les moins bons.

▪ Réduire la puissance installée (Résidentiel, bureaux)

Afin de réduire la puissance installée tout en maintenant un bon niveau de confort, il faut opter pour une solution d'éclairage qui vise à maintenir un niveau d'éclairement global relativement bas, de l'ordre de 200 lux. L'éclairage ponctuel (lampe de bureau muni d'ampoule fluo compacte) permet d'atteindre 400 à 500 lux sur le plan de travail.

Cette solution est plus confortable que ce qu'on rencontre actuellement, à savoir un éclairage de 500 lux (voir plus dans certains bureaux...) dans toute la pièce. La médecine du travail conseille d'ailleurs désormais un niveau d'éclairement de 220 lux pour le travail sur écran d'ordinateur.

▪ Installer des commandes automatiques

Plusieurs techniques de commande existent dans le marché, le choix dépend du lieu d'utilisation et de la précision de commande. On trouve :

- **la minuterie** : s'avère intéressante pour la commande de l'éclairage des sanitaires, voire des couloirs.
- **le détecteur de présence** : L'utilisateur n'agissant pas sur la commande, il permet d'éliminer tous dysfonctionnements. De plus, contrairement à la minuterie, la durée d'allumage est pratiquement identique à la présence.
- **calculateur astronomique** : il calcule à partir d'informations géographiques et temporelle, la position du soleil et détermine les instants de commutation.

▪ Privilégier l'éclairage naturel

Installer dans les bureaux des capteurs qui mesurent le niveau d'éclairement et qui permettent d'adapter en conséquence via le ballast la puissance des luminaires (et donc le niveau d'éclairement artificiel), voire même si l'éclairage naturel est suffisant de les éteindre.

II.2 Actions au niveau de l'éclairage public

▪ Les limiteurs d'énergie

Appelés aussi variateurs de lumière, leur fonction est de limiter l'énergie électrique fournie aux lampes à partir d'une loi en fonction des zones, ou autoriser le fonctionnement normal après avoir détecté automatiquement une présence dans un local ou une travée.

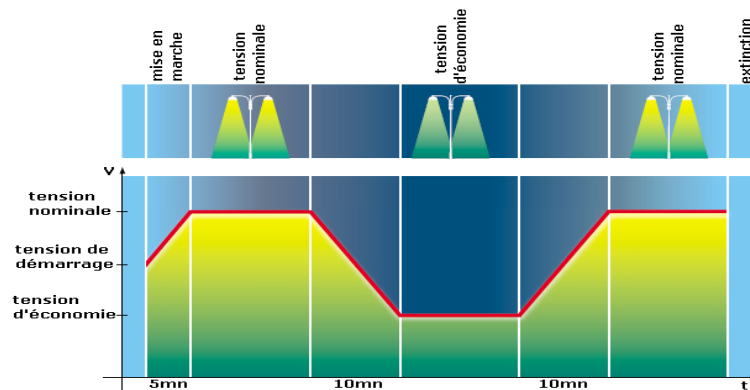


Figure 22: principe de fonctionnement du limiteur d'énergie pour l'éclairage

En plus de la préservation de la durée de vie des lampes, la solution permet de réaliser Jusqu'à 30% d'économie sur les kwh consommés :

- par optimisation des plages de fonctionnement,
- par la régulation de tension.

Certes, la mise en application de ces recommandations permet de réduire au maximum la consommation d'électricité liée à l'éclairage, mais vu le poids important de ce poste consommateur dans la facture électrique, il est nécessaire d'utiliser un logiciel de dimensionnement des installations d'éclairage afin d'évaluer les performances de la solution imaginée.

Dimensionnement de panneaux PV pour une alimentation partielle

I. Définition du besoin

Il s'agit d'une étude exploratoire sur la faisabilité d'une installation photovoltaïque (PV) qui vise à répondre à un besoin partiel en énergie électrique.

Mon choix s'est porté sur l'étude de faisabilité d'un champ PV pour l'alimentation de l'éclairage du terminal **TCE**.

L'objectif est :

- Assurer une autonomie d'une tranche d'heure de pointe par jour en distribuant l'énergie photovoltaïque stockée durant la journée dans des batteries.
- Le surplus d'énergie sera consommé pendant les heures creuses la nuit et les heures pleines le jour.

Il convient donc de calculer le besoin journalier en énergie électrique pour l'éclairage public qui diffère selon les saisons. Et comme on cible seulement les heures de pointe, on ne tien compte que du besoin correspondant à cette tranche.

Les matériels d'éclairage public :

type du matériel	Nombre de lampes par matériel	Puissance unitaire par lampe (W)	Puissance totale du matériel (kW)	Nombre de matériels
Mat A	8	400 (2*400)	6,4	48
Mat B	8	1000	8	12

La puissance installée totale est :

$$Pt = (48 * 6.4) + (12 * 8) = 403 \text{ kW}$$

En majorant de 10% (consommation des ballasts), le besoin journalier en énergie pendant la tranche heures de pointe, est :

$$\text{Besoin} = 443 * 5 = 2215 \text{ kWh/jour}$$

II. Dimensionnement de l'installation

II.1 Détermination de la puissance crête.

Les données de l'ensoleillement de Casablanca sont recueillies sur **RETSCREEN 4**.

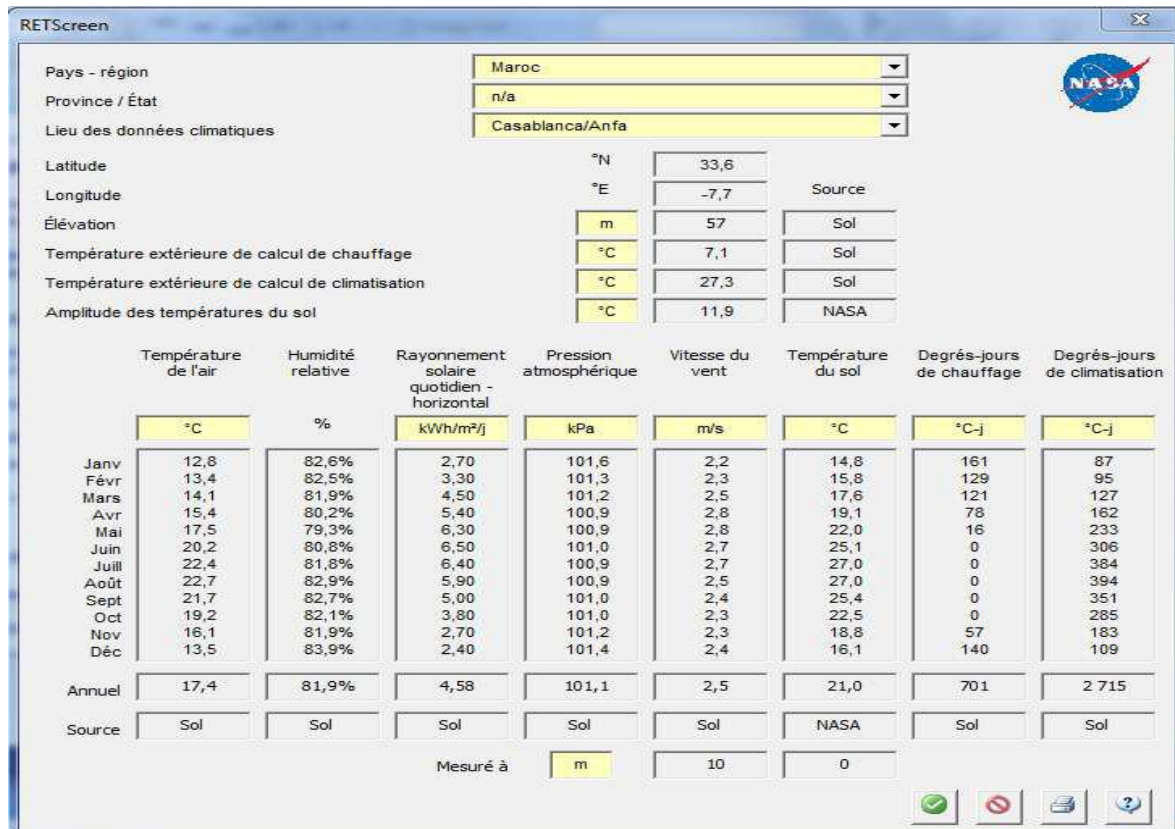


Figure 23: donnée d'ensoleillement journalier de la ville de Casablanca.

On retient donc un ensoleillement moyen : **4,5 Kwh/m².j**

II.2 Evaluation des pertes et du coefficient Cp

Il y'a d'abord les pertes par salissure du panneau, la poussière, le sable, ou encore par un vitrage placé devant. Ensuite, il y a les chutes de tension :

- entre la sortie du panneau et l'entrée de la batterie,
- aux bornes des diodes qui sont en série,
- aux bornes du régulateur s'il est utilisé,
- aux bornes des câbles, selon leur longueur, leur section et l'ampérage transporté.

Une autre perte affecte directement la tension du panneau, il s'agit de la baisse de la tension lorsque la température s'élève, la puissance crête étant, elle, donnée à 25°C.

On doit tenir compte de l'efficacité énergétique de la batterie qui est le rapport entre l'énergie restituée, et l'énergie fournie [14].

Certaines pertes peuvent être réduites et négligées par des moyens simples :

- le nettoyage régulier pour la salissure et l'optimisation du câblage pour les chutes de tension,
- la perte en température n'affectera pas beaucoup le fonctionnement puisque Casablanca est une ville d'une température assez proche de 20°C en moyenne,
- l'installation d'un régulateur **MPPT** pour éviter la perte par désaccord de tension,
- la technologie des modules est importante pour lutter contre les pertes en température. Les panneaux au silicium amorphe réagissent mieux aux faibles éclairagements que ceux au silicium cristallin. leur tension varie également beaucoup moins avec la température.

Les pertes en courant inévitables sont introduites dans les calculs énergétiques sous forme d'un coefficient **Cp** appelé ici : **coefficient de pertes en courant**.

Pour les salissures, on prend généralement **Cp** compris entre 0,9 et 0,95. Cela dépend des panneaux s'ils sont nettoyés régulièrement, placés à l'horizontale, derrière un vitrage....

Pour les batteries de plomb, le régulateur **MPPT** et l'onduleur le rendement est 0,9. Soit en moyenne un **Cp de 0,75**.

II.3 Détermination du nombre de modules photovoltaïques

On choisit les modules **Issol Cenit 220** qui sont du **silicium poly cristallin** de rendement 16% et de puissance crête 240 Wc et de tension au point max égale à 31,08 V.

La valeur minimale de la puissance photovoltaïque du système :

$$2\,215\,000 / (4,5 \times 0,75) = 656\,296 \text{ Wc}$$

Le nombre de panneaux est de :

$$597\,037 / 240 = 2734 \text{ panneaux}$$

➡ **2734 panneaux inclinés de 45° vers le sud. (Méthode de calcul standard est la latitude + 10° environ)**

Soit une surface :

$$1,48\text{m} * 0,99\text{m} * 2734 * 1,1 = 4\,407\text{ m}^2$$

Le toit exposé qui assure largement cette superficie se trouve au niveau du hangar magasin.



II.4 Choix des modules et de l'onduleur

Pour limiter les pertes en ligne par effet Joule ($P=RI^2$), il faut abaisser le courant (I^2), et donc élever la tension. C'est pourquoi on relie les modules en série.

Le nombre de modules branchés en série dans une chaîne est limité par la tension d'entrée supportée par l'onduleur. Le cas échéant, il faut répartir les modules entre plusieurs chaînes. Chacune aura alors une tension moindre, mais ... le courant global aux bornes d'entrées de l'onduleur sera plus élevé !... et il faudra s'assurer qu'il le supporte.

La compatibilité onduleur / chaîne consiste à vérifier que :

- la puissance nominale de l'onduleur est comprise entre 80% et 110% de la puissance crête
- les tensions générées doivent être dans les limites acceptables de l'onduleur :
- La tension maximale, doit être inférieure à la tension DC maximale admissible. C'est la tension de sécurité : au-delà de cette tension maximale, l'onduleur va disjoncter, l'installation sera en panne.
- La tension minimale doit être supérieure à la tension minimale admissible. C'est la tension d'accrochage : sous cette tension minimale, l'onduleur va décrocher, l'installation ne produira plus !

$$\text{Nombre max de modules} = \frac{\text{Umppt max}}{(\text{Umpp} \times 1,15)}$$

$$\text{Tension maximale à } -10\text{ °C : } U_{\text{max}} = M \times (\text{VOC} + \mu\text{VOC} \times 35)$$

$$\text{Tension minimale à } +70\text{ °C : } V_{\text{min}} = M \times (\text{VMPP} + \mu\text{VOC} \times 45)$$

M = nombre de modules d'une chaîne

VOC = tension du circuit ouvert d'un module dans CST (25°C)

μVOC = coefficient de température

VMPP = tension en charge, au Point de Puissance Maximale

- Le courant maximal doit être inférieur au courant admissible de l'onduleur

On choisit les modules **Issol Cenit 220** et les onduleurs **SUNNY CENTRAL 500CP XT** avec des chaînes de **22 x 124** modules soit **656 296Wc**.

Caractéristiques Onduleur **SUNNY CENTRAL 500CP XT** de **SMA**:

Show All / Hide All	SUNNY CENTRAL 500CP XT	SUNNY CENTRAL 630CP XT	SUNNY CENTRAL 720CP XT	SUNNY CENTRAL 760CP XT
- Input (DC)				
Max. DC power (@ cos φ = 1)	560 kW	713 kW	808 kW	853 kW
Max. input voltage ¹⁾	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V
Minimum input voltage / $U_{\text{MPP_min}}$ at $I_{\text{MPP}} < I_{\text{OCmax}}$	429 V / 430 V	498 V / 500 V	485 V / 485 V	510 V / 510 V
MPP voltage range (@ 25 °C / @ 50 °C at 50 Hz)	449 V – 850 V / 430 V – 850 V ²⁾	529 V – 820 V / 500 V – 850 V ²⁾	577 V – 850 V / 525 V – 850 V ^{2), 3)}	609 V – 820 V / 554 V – 850 V ^{2), 3)}
MPP voltage range (@ 25 °C / @ 50 °C at 60 Hz)	449 V – 850 V / 436 V – 850 V ²⁾	529 V – 820 V / 505 V – 850 V ²⁾	577 V – 850 V / 525 V – 850 V ^{2), 3)}	609 V – 820 V / 554 V – 850 V ^{2), 3)}
Rated input voltage	480 V	550 V	565 V	595 V
Max. input current	1250 A	1350 A	1400 A	1400 A
Number of independent MPP inputs	1	1	1	1
Number of DC inputs	9 / 32 (Optiprotect)	9 / 32 (Optiprotect)	9 / 32 (Optiprotect)	9 / 32 (Optiprotect)
- Output (AC)				
Rated power (@ 25 °C) / nominal AC power (@ 50 °C)	550 kVA / 500 kVA	700 kVA / 630 kVA	792 kVA / 720 kVA	836 kVA / 760 kVA
Nominal AC voltage / nominal AC voltage range	270 V / 243 V – 297 V	315 V / 284 V – 347 V	324 V / 292 V – 356 V ²⁾	342 V / 308 V – 376 V ²⁾
AC frequency / range	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz ... 63 Hz	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz ... 63 Hz	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz ... 63 Hz	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz ... 63 Hz
Rated frequency / rated grid voltage	50 Hz / 270 V	50 Hz / 315 V	50 Hz / 324 V	50 Hz / 342 V
Max. output current	1176 A	1283 A	1411 A	1411 A
Max. THD	< 3 %	< 3 %	< 3 %	< 3 %
Power factor at rated power / adjustable shift factor	1 / 0.9 leading ... 0.9 lagging	1 / 0.9 leading ... 0.9 lagging	1 / 0.9 leading ... 0.9 lagging	1 / 0.9 leading ... 0.9 lagging
Feed-in phases / connection phases	3 / 3	3 / 3	3 / 3	3 / 3

Caractéristiques du module Issol Cenit 220 :

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES		CENIT 200 SERIE POLY			CENIT 220 SERIE POLY		
Puissance maximale	Wc	200	205	210	230	235	240
Tension à puissance maximale	Vmp	27,05	27,38	27,65	30,54	30,9	31,08
Courant à puissance maximale	Imp	7,63	7,72	7,83	7,78	7,88	7,94
Tension en circuit ouvert	Voc	32,83	33,05	33,21	36,84	37,02	37,2
Courant de court-circuit	Isc	8,15	8,23	8,3	8,26	8,35	8,42
Tension maximum du système	V	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Coefficient de T° VOC	mV/°C	-118	-118	-118	-132	-132	-132
Coefficient de T° ISC	mA/°C	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Coefficient de T° Pmpp	%/°C	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
T° de fonctionnement	°C	-40/85	-40/85	-40/85	-40/85	-40/85	-40/85
Tolérances des mesures	%	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5
Puissance par m²	Wc	135,92	139,48	143,04	143,62	147,23	149,04
Rendement des cellules	%	15,7	16,1	16,5	16,3	16,7	16,9

Données en conditions STC: irradiance 1000W/m2, spectre AM 1.5 et température cellules 25°C.
Calibration par l'ISE Fraunhofer Freiburg sous STC. Sun Simulator AAA - Endeas Finland.



i s s o l | Modules standard
CENIT 200 / 220 SERIE POLY NATUREL

$$V_{oc} = 37,2 \text{ V} \quad V_{MPP} = 31,08 \text{ V} \quad I_{MPP} = 7,94 \text{ A} \quad \mu V_{oc} = -132 \text{ mV/°C} = (-0,132 \text{ V/°C})$$

→ Nombre max de modules par chaîne :

$$U_{mppt \text{ max}} / (U_{mpp} \times 1,15) = 1000 / (31,08 \times 1,15) = 27$$

→ Vérification de la tension maximale admise par l'onduleur : 1000 V

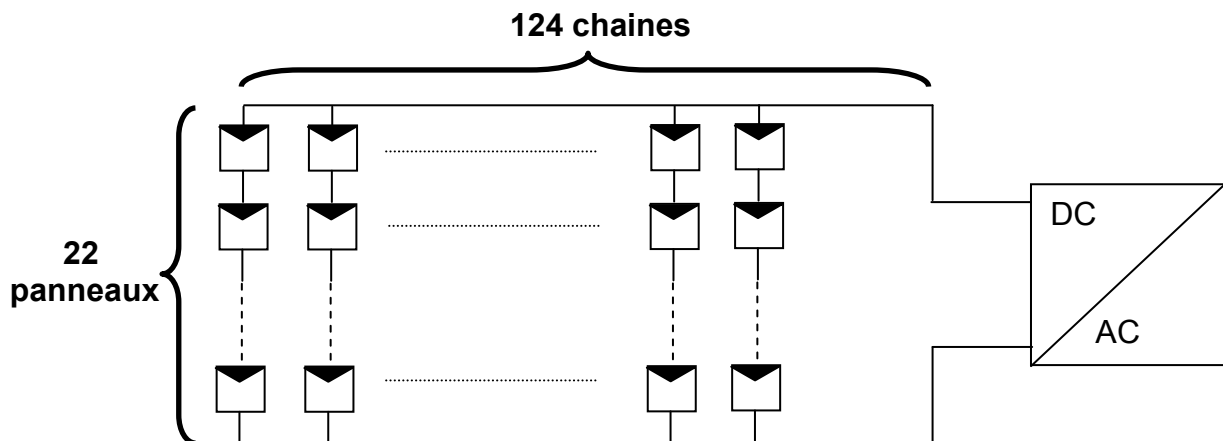
$$V_{max} = 22 \times (37,2 - ((-0,132) \times 35)) = 920 \text{ V} < 1000 \text{ V OK}$$

→ Vérification de la tension minimale admise par l'onduleur : 333 V

$$V_{MPP} = 22 \times (31,08 - ((-0,132) \times 45)) = 814,44 \text{ V} > 449 \text{ V OK}$$

→ Vérification du courant maximal admis par l'onduleur : 1250 A

$$V_{MPP} = 124 \times 7,94 = 984,56 \text{ A} < 1250 \text{ A OK}$$



II.5 Dimensionnement des batteries

Comme spécifié plus haut, les batteries doivent assurer une autonomie de 5 heures (heures de pointes où il fait nuit).

Le besoin journalier **2 215 kwh/jour** est l'équivalent de **46 145 Ah/jour** à une tension de **48 V**. Nous aurons donc une autonomie de :

$$C = 46\ 145\ \text{Ah/jour}$$

La capacité nominale doit tenir compte de la profondeur de décharge et de la température, une batterie ne doit pas être déchargée en dessous d'un certain seuil sinon on risque de l'endommager.

En pratique, en absence de problème de basses températures et pour un usage normal, on applique un coefficient PD = 0.7 à 0.8 selon les modèles de batteries : 0.7 pour les batteries qui supportent un faible nombre de cycles et 0.8 pour les batteries à fort nombre de cycles.

Si l'application est amenée à fonctionner à basse température, ce sera la principale cause de réduction de capacité, car les réactions de charge et de décharge de l'accumulateur sont ralenties par le froid. Pour déterminer la réduction de capacité qui en résulte, on aura besoin de courbes de décharge à différentes températures fournies par le constructeur de la batterie.

Dans notre cas on choisira RT=0,9. Ce qui nous donne, in fine, la capacité de la batterie C20 (pour une décharge de 20h à 25°C normalisée)

$$C_{20} = C / [PD * RT] = C / (0,8 * 0,9) = 64\ 091\ \text{Ah}$$

Le nombre des batteries et la capacité de chacune dépend du courant de charge et de la tension de chacune. Le plus important est que le total soit de **256 361 Ah**.

Le choix des batteries tubulaire **Gel 2V 720 Ah / A 600 SONNENSCHNEIN - 6 OPzV 720**, nécessite **80 unités**.



Mesures d'économie liées aux portiques à conteneurs

L'économie d'énergie au niveau des portiques nécessite la mise en œuvre de certaines mesures qui peuvent avoir un aspect fonctionnel lié au mode d'exploitation, ou un aspect technique lié au mode de fonctionnement.

I. Mesures liées au mode d'exploitation

Réduire le temps mis en jeu par le portique pour accomplir les opérations de chargement et de déchargement contribue à économiser l'énergie par la réduction de la consommation.

Pour y arriver, certaines mesures sont à mettre en œuvre [15] [16] :

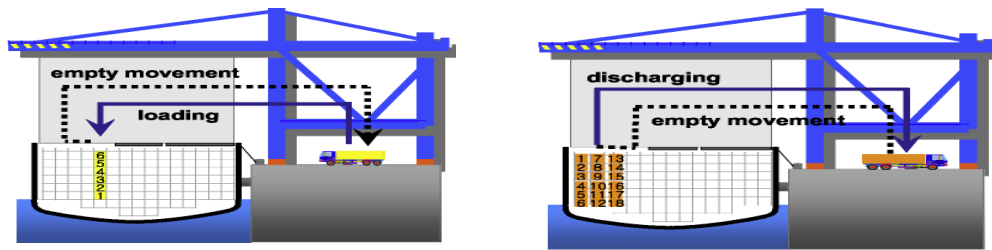
- Adoption d'une politique efficace de maintenance afin de diminuer le taux de pannes et améliorer le taux de disponibilité des portiques,
- Automatisation de l'opération d'identification et d'enregistrement des conteneurs déchargés du navire, ou se mettre en accord avec le client sur une procédure qui va dans ce sens,
- Suppression de la redondance dans certaines procédures douanières ou de contrôle,
- Réduction du temps de cycle de manœuvre (le temps que met le portique pour charger ou décharger un conteneur).

Durée du cycle déchargement	120 s	80 s	60 s	40 s
Durée de déchargement du navire	33 h 20 mn	22 h 13 mn	16 h 50 mn	11 h 8 mn

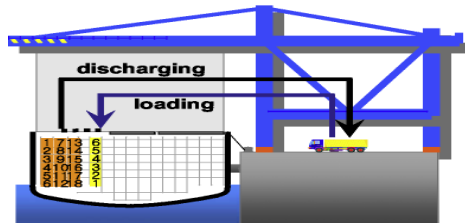
Tableau 32: Temps de déchargement de 1000 conteneurs en fonction du temps de cycle

- Adoption du cycle double qui consiste à permettre au portique de décharger un conteneur dans le même cycle qu'une opération de chargement, ce qui revient à doubler la tâche accomplie par le portique en un cycle.

Le concept est illustré ci dessous:



a) Le chargement ou le déchargement simple conduit à un mouvement vide.



b) pas de mouvement vide pour le cycle double

Figure 24: Chargement et déchargement des conteneurs en dual cycle

II. Mesures liées au mode de fonctionnement

II.1 Utilisation d'équipements performants

- **Spreader électrique** : La généralisation de l'utilisation du spreader électrique au lieu de l'hydraulique, permet de bénéficier des avantages :
 - silencieux, consomme moins d'énergie environ 1/10 de celui en hydraulique,
 - les moteurs électriques équipant ce type de spreader ne consomment de l'électricité que quand une opération est effectuée.
- **Tandem-lift** : c'est un concept permettant au portique de manipuler plusieurs conteneurs en même temps, ce qui se traduit par la réduction de l'énergie électrique mise en jeu. Ce système est « Single-hoist » ou « Dual-hoist » :
 - **Single-hoist** : il permet de manipuler jusqu'à 4 conteneurs 20 pieds.
 - **Dual-hoist** : il permet de manipuler deux spreaders séparés lors de chaque mouvement, ou utiliser un seul levage pour un fonctionnement simple.



Figure 25: Manutention des conteneurs en mode Twin-Lift et Tandem-Lift

II.2 Récupération et stockage de l'énergie sur le portique

Les moteurs du levage fonctionnent en 4 quadrants,

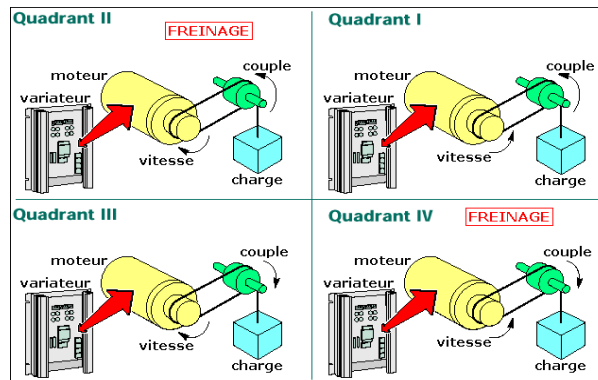


Figure 26: Fonctionnement des moteurs du levage en 4 quadrants

En fonctionnement moteur il y a consommation de l'énergie électrique, inversement, en fonctionnement générateur, il y a consommation de l'énergie mécanique et fourniture de l'énergie électrique [17].

- Passage du quadrant « I » au quadrant « II » : La vitesse change de signe ce qui signifie un changement de sens de rotation, par contre le couple reste positif.
- Passage du quadrant « I » au quadrant « III » : C'est un fonctionnement moteur avec deux sens de rotation. La charge est entraînée dans deux sens de rotation.
- Fonctionnement dans le quadrant « IV » : C'est le fonctionnement en génératrice pure. La génératrice à courant continu en est un exemple.
- Passage du quadrant « I » au quadrant « IV » : C'est le fonctionnement en mode freinage ou décélération. L'objet en mouvement continue sa trajectoire dans le même sens mais le couple s'inverse.

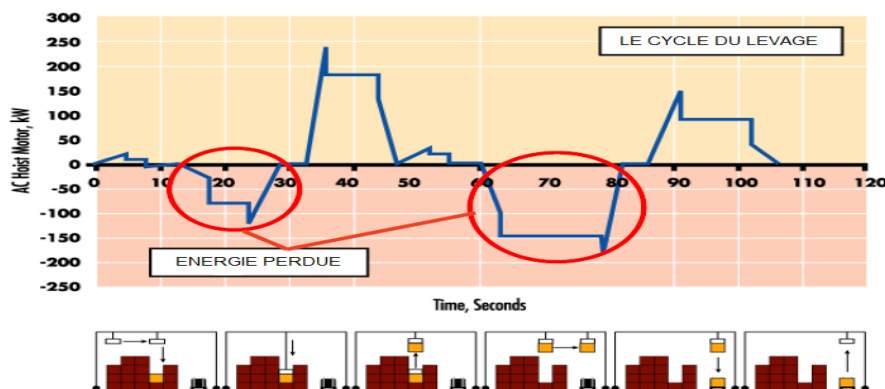


Figure 27: l'énergie perdue lors de chaque cycle du levage

Lors du mouvement de la descente, le moteur tourne plus vite que le champ tournant et le transfert d'énergie s'inverse faisant tourner la machine en générateur, d'où l'avènement de la récupération d'énergie sur le portique. Plusieurs systèmes le permettent tel que : les super capacités, les volants d'inertie et les batteries.

II.3 Privilégier AC ou DC

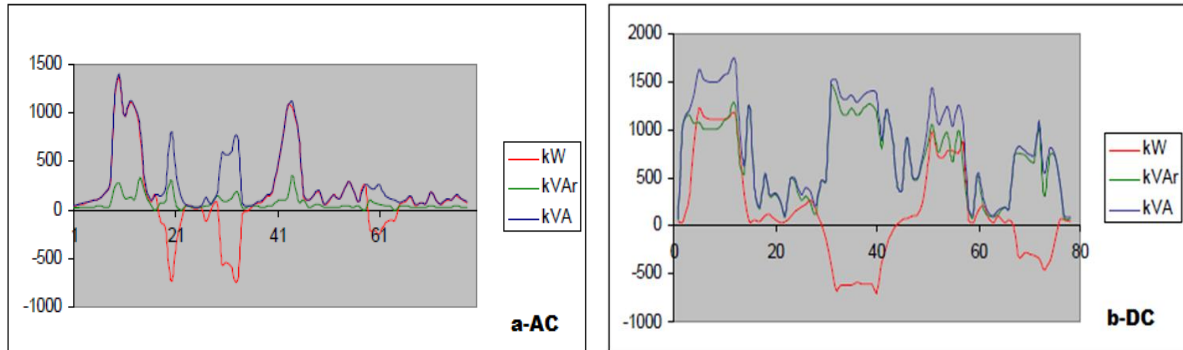


Figure 28: Cycles de levage en alternatif et en continu

La figure 32 montre les graphiques d'alimentation de deux entraînements un en AC 'a', et l'autre en DC 'b'.

On remarque que la pointe de la demande en kW de l'entraînement en AC est supérieure à celui en DC. En contrepartie la demande de l'énergie réactive pour le portique en AC est beaucoup plus faible que celui du portique en DC.

Le choix de la technologie d'entraînement à courant continu est souvent le plus préféré, grâce à la faiblesse des pertes des composants électroniques de puissance, et le faible coût du système d'entraînement global [14].

En plus des exigences d'entretien accrues pour les moteurs à courant continu par rapport aux moteurs à courant alternatif, il y a l'inconvénient de ce qu'on appelle «**l'échec commutation de l'onduleur**», qui peut se produire dans certaines conditions de fonctionnement et qui peut faire sauter les fusibles et dans le pire des cas endommager les thyristors.

La technologie AC évolue au quotidien, le contrôle de la vitesse et du couple sont devenus similaires à ceux des entraînements en DC. Quand il s'agit de nouvelles applications, les variateurs AC constituent inmanquablement la meilleure solution [15].

II.4 Réduire la consommation des moteurs électriques

Les moteurs électriques fonctionnent généralement loin de leur capacité nominale, donc loin de leur rendement optimal ce qui rend leur consommation d'électricité excessive par rapport aux besoins réels. Pour la réduire, plusieurs solutions sont à opter:

- adapter la vitesse au besoin
- optimiser le rendement
- réaliser des opérations de maintenance

II.4.1 Variateurs de vitesse

Lors du démarrage d'un moteur asynchrone, le courant peut atteindre 8 fois le courant nominal de la machine. Si un variateur est installé, celui-ci se chargera aussi d'adapter l'amplitude des tensions appliquées à la machine afin de limiter le courant donc la puissance active absorbée.

Les courbes de démarrages ci-dessous montrent que l'appel de puissance de la moto pompe à démarrage direct est considérable par rapport à celui d'une motorisation hydraulique à variateur de fréquence.

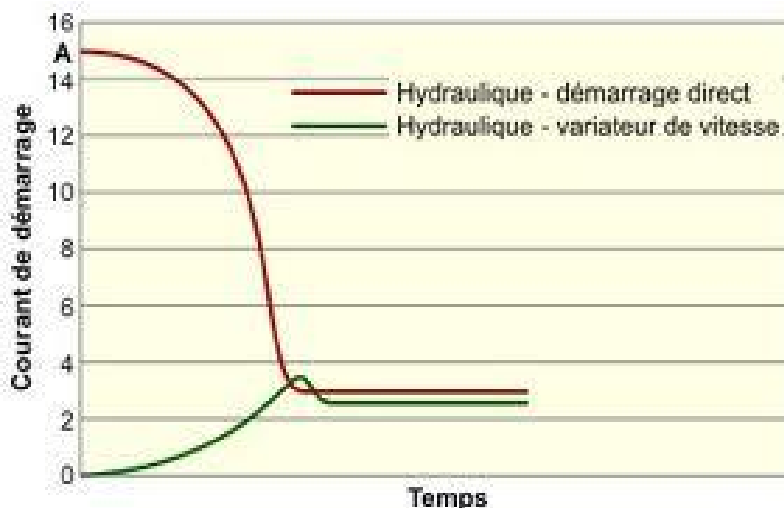


Figure 29: Appel de courant au démarrage d'une moto pompe

Le variateur adapte en permanence la puissance du moteur à la charge. Par exemple, dans le cas des pompes hydrauliques, la puissance absorbée est une fonction de la vitesse du fluide au cube. Or, bien souvent, le débit des réseaux hydrauliques est régulé par étranglement alors que la pompe qui assure la circulation du fluide tourne à plein régime.

II.4.2 Moteur haut rendement

Les moteurs qui tombent en panne sont souvent réparés plusieurs fois pendant leur durée d'utilisation. Des tests ont mis en évidence que des réparations de mauvaise qualité réduisent le rendement du moteur en moyenne de 0,5 à 1%, et parfois jusqu'à 4% ou même plus pour de vieux moteurs [13].

Les principales causes de dégradation de son rendement sont :

- la perte des propriétés des tôles et de leur isolation,
- la détérioration des roulements (lubrification, roulements inadaptés),
- un mauvais alignement des flasques,
- la modification de la ventilation ou du nombre de spires.

Devant ces insuffisances, il serait judicieux remplacer les moteurs enregistrant des taux de pannes important, par des moteurs à haut rendement **HEM**. Le principal avantage des moteurs **HEM** est l'économie d'énergie qu'ils permettent de réaliser. Ils consomment de 1 à 4 % moins d'électricité que les moteurs standard, ils sont généralement plus fiables et plus durables et ils imposent une charge moins lourde au transformateur.

Le choix entre réparation et remplacement doit se faire en prenant en compte le coût de l'électricité par kwh, la puissance du moteur, le facteur de charge moyen et le nombre d'heures de fonctionnement par an.

Chapitre 5 : Gains réalisables et retour sur investissement

I. Economies sur la consommation électrique

En se basant sur des calculs approximatifs, prenant 2011 comme année de référence. On détermine ici, les économies envisageables correspondantes aux mesures préconisées.

• Eclairage

Selon une étude réalisée par **l'ADEME**, les économies possibles à réaliser dans l'éclairage, sont résumées dans le tableau:

Economies de consommation possibles
- 30% par le remplacement des lampes mercure par des lampes sodium - 25% par l'installation de réducteurs/variateurs de puissance - 10% par la mise en place de ballasts électroniques - 5% par la mise en place de commandes d'allumage plus précises
Sources : Ademe

Pour établir un bilan des consommations électriques par tranche tarifaire pour l'éclairage, il faut connaître la puissance électrique des différents luminaires et leur temps de fonctionnement. Or, ce dernier paramètre dépend de la nature de la zone desservie et de son usage.

Les profils d'occupation pris en compte dans les calculs ci-après sont donnés dans le tableau suivant :

zone	Lundi au vendredi	Samedi	Dimanche
Eclairage public	18h-7h		
Bâtiments administratifs	9h-16h	9h-12h	
Ateliers, salle de controle et vestiaires	7h-7h		7h-23h

Les temps de fonctionnement de l'éclairage ne sont pas toujours simples à déterminer. Le poids du facteur humain a alors une incidence très importante sur les consommations électriques.

La consommation annuelle de chaque type du matériel d'éclairage, est déterminée a partir du bilan des puissances (*page 45*) et le temps de fonctionnement au dessus.

Après calcul des consommations annuelles de chaque type d'éclairage, et application des taux au dessus. On obtient les valeurs suivantes :

Type d'éclairage	Consommation annuelle actuelle (kWh)	Actions	Consommation annuelle future (kW)	Economie
Lampes incandescentes (100W)		Remplacement par des lampes basses consommation (36W)		
Tubes fluorescents		Utilisation des ballasts électroniques		
Lampes HPS		Utilisation des limiteurs d'énergie		
Lampes à vapeur de mercure		Remplacement par des lampes sodium		

Tableau 33: Economie envisageable grâce aux équipements performants en éclairage

La consommation calculée précédemment est répartie sur les heures de la journée et sur les mois de l'année pour lui faire correspondre un prix de kWh adapté.

Donc l'économie envisageable est: **473 563 kWh/an**, l'équivalent de **376 482 DHS/an**.

- **Energie photovoltaïque**

L'utilisation des panneaux photovoltaïques déjà dimensionnés, va permettre d'économiser la consommation de l'éclairage public pendant les heures de pointes.

- la puissance installée de l'éclairage public est **402 kW**,
- la période ciblée s'étend sur **5h (18h-23h)**,
- tarif appliqué : **1,24 DHS/kWh**

Donc l'économie envisageable est: **733 650 kWh/an**, l'équivalent de **909 726 DHS/an**.

- **Amélioration du mode de fonctionnement des portiques**

La mesure de la puissance appelée par un portique pendant son fonctionnement, a donné les valeurs suivantes :

P Phase 1_PTR7	
P Phase 2_PTR7	

P Phase 3_PTR7	
P somme des phases	

La cadence moyenne de manutention des conteneurs enregistrée pendant les dernières années est de 25 mouvements par portique et par heure. Au niveau international, elle est:

Europe	Extrême Orient	Amérique	Moy.Orient/Inde	Océanie
30 mvts/port./h	32 mvts/port./h	26 mvts/port./h	25 mvts/port./h	30 mvts/port./h

Le nombre de boites manutentionnées au **TCE** en 2011, est : **314 521 boites Eqv 503 233 evp**.

Avec une cadence égale à **25 mvts/heure**, les opérations de manutention nécessitent une durée cumulée d'affectation égale à **12 580 heures**.

En introduisant les améliorations déjà citées, la productivité des portiques va augmenter. La cadence peut devenir égale à celle des terminaux européens : **30 mvts/heure**. Cela signifie que la durée totale des opérations de manutention sera aux alentours de **9 828 heures**.

La différence est : **12580 – 9828 = 2752 heures**.

Sachant que la puissance appelée par un portique est en moyenne **260 kW** (voir tableau en haut), on conclut que l'économie envisageable serait : **715 520 kWh**.

Résumé :

Secteur	Energie économisée (kWh)
Éclairage	
Photovoltaïque	
Portiques	
Total	

II. Economie sur la facture électrique

On rappelle la contribution des différentes composantes de la facture électrique.

Composante		Montant (DHS)
Consommation électrique		
RPS		
Pénalités	RDPS	
	Pénalités FP	
Total		

- **Puissance souscrite**

On a déjà trouvé que la puissance souscrite optimisée est : **kVA**. Ca correspond aux redevances suivantes :

L'économie réalisée sur la RPS est :

L'économie réalisée sur la RDPS est :

- **Pénalités FP**

L'étude faite sur la compensation de l'énergie réactive et le filtrage des harmoniques, cible un facteur de puissance $FP = 0,95$. Ca correspond à une **pénalité nulle**. Donc l'économie est :

- **Consommation électrique**

L'énergie électrique économisée est :, c'est l'équivalent d'un montant égal à

Les gains escomptés sur la facture, sont résumés sur le tableau suivant :

Composante		Facture Avant (DHS)	Economies réalisées (DHS)	Facture après (DHS)
Consommation électrique				
RPS				
Pénalités	RDPS			
	Pénalités FP			
Correction des factures*				
Total				

Tableau 34: Synthèse des gains escomptés sur la facture électrique

* selon une étude faite par le bureau d'étude NORMINDUS

III. Investissement

- **Photovoltaïque**

matériel	Marque	Description	Quantité	Prix unitaire (DHS)	Prix total (DHS)
Module PV	Issol Cenit 220				
Onduleur	SC 500CP XT				
Batterie	SONNENSCHNEIN				
Installation + Génie civil	-				

- Filtrage des harmoniques**

Les caractéristiques des filtres à installer sont :

PT	Bus	H5	H7
PT1	B_TR 1_1		
PT2	B_TR 1_2		
PT3	B_TR 2_3		
PT4	B_TR 1_4		

Portique	H5	H7	H11	H13
P3				
P5				
P8				
P9				

Après consultation des prix des batteries condensateurs, des selfs et d'appareillages sur le net, en ajoutant les frais d'installation et de mise en marche. L'investissement nécessaire est estimé à **2 000 000 DHS**.

- Eclairage**

Action	Nombre d'unités	P.U (DHS)	Prix total (DHS)
--------	-----------------	-----------	------------------

Remplacement des tubes T8 par T5 + Ballast électronique			
Détecteurs de présence			
Limiteurs d'énergie			
Installation + (appareillages, câbles ...)	-	-	
Total			

Synthèse

L'investissement total est estimé à

Le gain annuel est estimé à

Le retour sur investissement est inférieur à **4 ans**.

Conclusion

Ce rapport présente une étude d'amélioration de l'efficacité énergétique du **TCE**. Dans cette perspective, j'ai adopté une démarche consistant en première étape à réaliser un audit approfondi des secteurs consommateurs de l'énergie électrique permettant de déceler les possibilités d'optimisation et d'amélioration.

Dans une première analyse, la réduction du coût de l'énergie électrique consommée a nécessité une meilleure connaissance de sa tarification, une vérification de la bonne adaptation de la consommation aux contraintes tarifaires, une lutte contre les gaspillages et une amélioration des rendements.

L'un des constats que j'ai pu formuler à l'issue de l'analyse de l'ensemble des factures électriques, fut qu'il y ait une inadaptation du contrat de fourniture par rapport au profil de consommation, et ce notamment au niveau de la puissance souscrite et des options tarifaires.

Une analyse de la consommation électrique a permis de mieux comprendre le profil de consommation et par conséquent d'envisager d'éventuelles actions qui permettent de mieux consommer et de diminuer le niveau de consommation, car le meilleur moyen de faire des économies est de ne pas consommer.

L'analyse de la qualité de l'énergie électrique mise en jeu a révélé qu'il y ait une forte pollution harmonique et une consommation excessive de l'énergie réactive.

Après établissement d'un rapport sur les insuffisances et les anomalies rencontrées, plusieurs recommandations ont été préconisées et des solutions ont été proposées.

Ensuite, j'ai fait une étude technique des solutions et améliorations retenues dans le cahier de charges. Ceci pour évaluer la faisabilité, l'importance et la mise en œuvre de chaque action.

Le plan d'action élaboré a été subdivisé en deux parties :

1. Optimisation des éléments de facturation :

- comptage électrique en tête de boucle,
- optimisation de la puissance souscrite,
- gestion des tranches horaires,
- amélioration du facteur de puissance par la compensation de l'énergie réactive et le filtrage des harmoniques,

2. Réduction de la consommation électrique :

- amélioration de l'efficacité énergétique de l'éclairage,
- dimensionnement de panneaux photovoltaïque pour une alimentation partielle,
- mesures d'économie d'énergie liées aux équipements.

Une évaluation des gains réalisables suite à la mise en œuvre de ce plan d'action a révélé que des économies consistantes peuvent être obtenues ; elles se chiffrent en MDHS.

Certes l'emploi de techniques électriques performantes conduit bien souvent à un coût d'investissement élevé, mais avec la conjoncture actuelle et la flambée des prix que connaissent les sources classiques d'énergie, l'utilisation de ces outils d'optimisation actuellement coûteux ne saurait tarder pour être plus que rentable et devenir incontournable.

Bibliographie

- [1] "Plans, schémas et relevés des portiques"; Documents MARSA MAROC.
- [2] "Handbook of Terminal Planning"; J.W. Böse (Ed), (Operations Research Computer Science Interfaces Series 49). March 9, 2011.
- [3] "Loi 47/09 relative à l'efficacite energetique"; Ministere de l'energie et des mines
- [4] http://www.nbpower.com/html/fr/business/power_energy/load_factor.html
- [5] "Le guide, compensation de l'énergie réactive"; Enerdis. Chauvin-Arnoux newsletter. Ed. 1 - 02/2011.
- [6] "HARMONIC ANALYSIS FOR DISTRIBUTION SYSTEMS"; Larsen & Toubro Limited, Engineering Construction & Contracts Division, Chennai 600089
- [7] "Guide pratique du marché de l'électricité"; ABEA.
- [8] "Catalogue distribution électrique"; Schneider Electric, 2002.
- [9] "ct152, ct183, ct199"; Cahier technique Schneider.
- [10] "Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique"; Éric Félice, Philippe Révilla, 2009 Paris.
- [11] <http://etap.com/quality-assurance/qa-case-load-flow.htm>, ETAP/Operation Technology, Inc., site officiel
- [12] "Guide de référence de l'éclairage"; Ressources naturelles Canada.
- [13] "Guide de l'installation électrique 2010"; Schneider Electric.
- [14] http://www.lifttech.net/pubs_cranes.php Lifttech Consultant Inc .
- [15] www.porttechnology.org
- [16] série de la gestion de l'énergie 14, à l'intention des industries, commerce et institution.
- [17] "Projet GEM – Gestion de l'Energie dans les Entreprises Marocaines"; Ministère de l'Energie et des Mines.
- [18] "Automation of Ship-To-Shore Container Cranes"; ZRNIĆ, N., PETKOVIĆ, Z., BOŠNJAK, S. Vol. 33, No 3, 2005.
- [19] "Maximizing the number of dual-cycle operations of quay cranes in container terminals"

Zhang, H., Kim, K.H. Computers and Industrial Engineering 56, 979–992, 2009.

[20] <http://www.ademe.fr>; Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

[21] <http://www.retscreen.net>; RETScreen® International.

[22] http://photovoltaique.guidenr.fr/coursphotovoltaique-2011/cours_photovoltaique.php.

[23] http://sites.final.uclouvain.be/eleee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/Dimensionnement/DefinitionModules/definition_1.htm.

[24] <http://fr.leonardo-energy.org/wp-content/uploads/2008/01/variateurs-devitesse.pdf>.

[25] "L'alimentation des circuits d'eclairage"; CT205.

Annexes

Description des mouvements du portique

Les principaux mouvements du portique sont : le levage, la translation chariot, la translation portique et le relevage avant-bec.

I. Mécanisme de levage

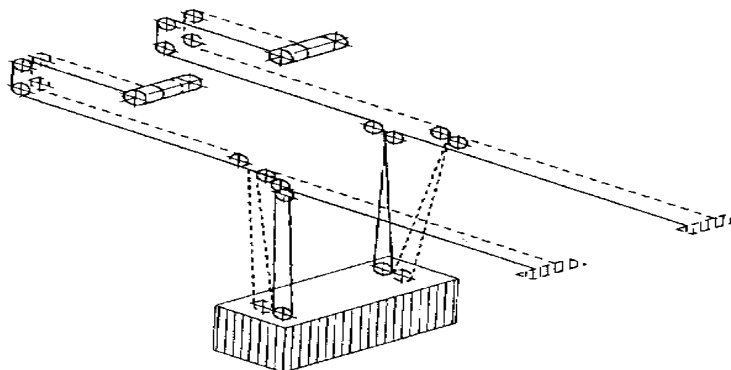
Le levage est l'exécution du mouvement de la montée ou celui de la descente, d'un Spreader tenu par un palonnier (dispositif de levage qui permet de soulever une charge en répartissant le poids sur plusieurs prises). Le conteneur est saisi par le Spreader à l'aide de quatre verrous tournants (« twist locks »), qui se logent dans les quatre coins supérieurs du conteneur.

Le treuil de levage (ou le tambour de câbles), placé dans la salle machine, est formé par un groupe de deux moteurs à CC à excitation séparée de puissance ou à CA, les deux moteurs sont alimentés par deux variateurs de vitesse séparés, dotés d'un système à thyristors permettant le contrôle de la vitesse du levage.

Par ailleurs, un encodeur est monté sur l'arbre du moteur pour indiquer la hauteur du levage, les deux moteurs sont accouplés sur un réducteur à axes parallèles. Le treuil de levage assure l'enroulement ou le déroulement des câbles d'aciers qui maintiennent la charge soulevée.

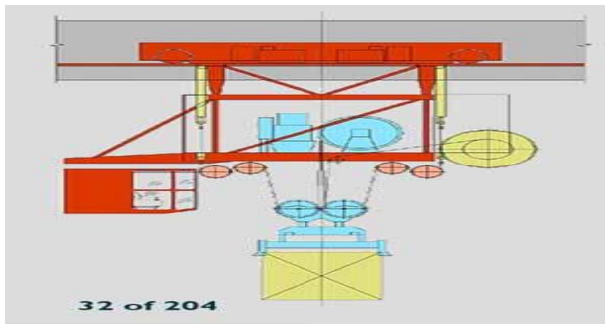
II. Translation chariot

La translation de chariot assure le déplacement horizontal de chariot sur les rails le long de la poutre de l'avant et l'arrière bec.



La direction de chariot est réalisée au moyen de quatre moteurs asynchrones, ils sont accouplés à quatre réducteurs placés directement sur l'arbre des quatre Galets du chariot.

Le chariot ne peut se déplacer sur toute sa course que lorsque l'avant bec est en position basse ; la position de travail.



III. Mécanisme de relevage avant-bec

La flèche du portique est articulée sur le côté de l'eau, en sorte qu'il peut se déplacer vers le haut et le bas que par l'exigence de l'opération de fret ou de navigation. L'avant bec est une poutre du portique côté mer, qui peut avoir deux positions :

- La position horizontale lorsque le portique est sous exploitation,
- La position verticale quand il n'y a pas de navire sur quai.



Le groupe de relevage est composé d'un moteur connecté à un réducteur et un frein. Un tambour est fixé pour le bobinage des câbles du relevage et sur l'axe de ce dernier se déplace l'encodeur qui sert à régler la vitesse du mouvement et déterminer la position de l'avant bec.

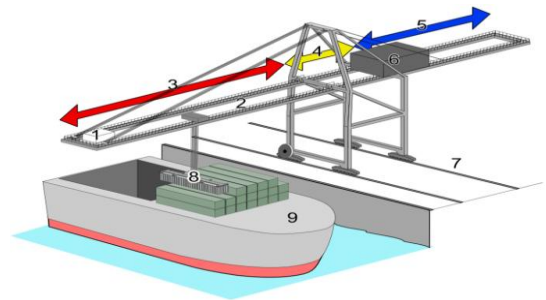
IV. Système de translation portique

Ce mécanisme permet au portique de se déplacer sur les rails le long du quai, au moyen de galets de translation pour pouvoir accéder aux conteneurs d'une rangée à une autre quel que soit la position du navire par rapport au quai. Ceci grâce à des moteurs branchés en parallèles, via un variateur de vitesse.



V. Mode opératoire

La commande (conduite) du portique se fait à partir de la cabine '2', et elle est assurée par un opérateur de grue (grutier) spécialement formé, sa mission est le déchargement et le chargement des navires.



- Déchargement du navire « import » : le grutier déplace le chariot sur l'avant-bec '3', soulève le conteneur à l'aide du Spreader '8' du navire porte-conteneurs '9' et revient vers l'arrière-bec '4' et '5' pour le déposer soit sur un tracteur, qui le déplacera à son tour vers une zone de stockage, ou sur le quai '7' dans ce cas il sera transporté par un chariot cavalier.
- Chargement du navire « export » : le même cycle est exécuté à l'inverse, les conteneurs seront acheminés de la zone de stockage vers le portique permettant ainsi au grutier de les charger sur le navire.

Le système électrique, la logique de commande ainsi que l'appareillage de sécurité se trouve dans la salle électrique '7'.

Logiciel ETAP



ETAP est un logiciel de la société **ETAP/Operation Technology, Inc. USA**, il est utilisé pour la conception de systèmes électriques et d'analyse, **ETAP** offre un ensemble de solutions d'énergie entièrement intégrés d'ingénierie logicielle, y compris l'arc, flux de charge, court-circuit, la stabilité transitoire, la coordination de relais, le débit de puissance optimal, et plus encore. **ETAP** est une plateforme d'analyse complète pour la conception, la simulation, l'exploitation et l'automatisation de la production, la distribution et les systèmes d'alimentation industriels. Comme une solution entreprise pleinement intégrée, **ETAP** s'étend en temps réel système intelligent de gestion de l'alimentation pour surveiller, contrôler, automatiser, simuler et optimiser le fonctionnement des systèmes d'alimentation.

Un schéma unifilaire est le mode de représentation de la modélisation du système électrique dans **ETAP** pour les analyses de réseau. **ETAP** soutient la création d'un nombre illimité de présentations de schémas unilaires. Cette fonction permet de personnaliser chaque unes d'elles et de générer différentes représentations graphiques.

ETAP propose une large gamme d'applications d'analyse de réseau pour l'ingénierie électrique:

- Analyse du réseau des Système AC & DC
- Surveillance en temps réel et simulation
- Dispositifs de protection - Coordination de périphériques / Sélectivité
- Test de relais automatique et transitoire Simulator
- Systèmes de panneaux - ANSI et CEI
- Systèmes de grille de terre
- Analyse de câble thermique

ETAP utilise en temps réel des données de la topologie du système couplée à des techniques avancées d'estimation d'état pour déterminer les flux de puissance et de tensions dans tout le système, il permet une analyse complète pour l'exploitation, le contrôle, l'optimisation et l'entretien de l'installation.