

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Electromécanique

## THÈSE

*présentée en vue de l'obtention du diplôme de*

**DOCTORAT D'ETAT**

**OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION DE L'ENERGIE  
ELECTRIQUE DANS LES ELEMENTS DU SYSTEME  
D'ALIMENTATION (CONDITION DE LA CIMENTERIE DE  
AIN-TOUTA )**

Option : Electromécanique

Par

**KARA MOHAMMED**

**DIRECTEUR DE THESE:**

Mr.: HADDOUCHE ALI M . C Université Badji Mokhtar Annaba

**DEVANT LE JURY**

**PRESIDENT:**

Mr.: SAAD SALAH M . C Université Badji Mokhtar Annaba

**EXAMINATEURS:**

Mr.: LABARE HOCINE M . C Université Badji Mokhtar Annaba

Mr: BENCHIBA CHALLALI M . C Centre Universitaire de Bechar

Mr: BOURAS SLIMANE M . C Université Badji Mokhtar Annaba

Décembre 2007

## ملخص

الكهرباء هي طاقة ثمينة و من الصعب تخزينها علي شكلها الطبيعي و من ثم وجب علي كل الصناعيين استعمالها عن معرفة و بطرق عصرية تجرّها لتحسين فعالية الأجهزة و الأساليب و تخفيض الخدمات الغير نافعة. و من هذه الغاية لقد قمنا ببحوث و دراسات خاصة ببعض الحالات و استعملنا طرق البحث علي شكل النظري و العملي و ذلك للحصول على معلومات جديدة تتمثل في الاستعمال القياسي للكهرباء شاملة عناصر التوزيع للمؤسسات الصناعية كثيرة استهلاك الطاقة

و لهذا الغرض لقد قمنا بإعداد مثال رياضي جديد لاستهلاك الطاقة الكهربائية لآلة سحق خام. و أسسنا هذا المثال علي الحالة التي عليها مصنع الاسمنت بعين التوتة الجزائر. و قد استعملنا في نجاح هذا المثال الطريقة التجريبية السلبية. و هذا المثال سيمكننا من الحصول عل المعلومات الكافية لمعرفة اقتصاد الطاقة الكهربائية في حالة الاستهلاك الأجود.

مع العلم أن محتوى هذه الرسالة غير محصور في البحث عن اقتصاد الطاقة الكهربائية المتعلق بالأجهزة التكنولوجية لآلات السحق الخام لكننا وسعنا رقعة البحث أكثر من ذلك إلى الأجهزة الكهربائية و المؤسسات المماثلة.

إن التطبيق الجديد والذي اقترحاته بمصنع الاسمنت الماء الأبيض حيث يتمثل في كيفية استعمال طريقة الحد الاقصى للبحث عن نظام قياسي متعلق بعمل عدد من المحول شبيه لبعضه و وضع للخدمة موازى بالتتابع قد برهنت نتائجها مؤخرا في المنشورة العلمية و هو موضوع الرسالة. و إن الدراسات التي أجريناها في هذا المجال أظهرت بمعيار هام أخذ القرار لانتقال من محول إلى محولان و يتمثل هذا المعيار في الحمولة الأمثل بدلالة الصلة ما بين الضياع الشاغر و الضياع العملي للطاقة و الاستطاعة الاسمية للمحول وكذلك العدد الممكن تشغيله. و علي ضوء هذا استخرجنا أن الحمولة المتوسطة سنويا تتراوح ما بين 796.7 و 1380 كيلو فلت أمبير و بإمكان وضع محولان بسعة 1000 كيلو فلت أمبير في الخدمة بالتوازي لهذا الغرض كافية لتغطية متطلبات المؤسسة و عليه بنينا بحثنا أن تشغيلهما قد بلغ دائرة النظام القياسي و ستكون مساهمتها في المستقبل ضمان اقتصاد الطاقة و ستمكن هذه الأخيرة ما ترجوا إليه المؤسسة ألا و هو التقليل من استهلاك الكهرباء.

بالتوازي بحثنا أيضا عن اقتصاد الطاقة الكهربائية في نقاط أخرى جديدة لا تقل أهمية عن سابقتها تتمثل في .

- اقتراح طريقة جديدة لاختيار موقع محطات توزيع الكهرباء ( طريقة التوازن)
- دراية كيفية تحديد التعريفق الأفضل
- البحث عن اقتصاد الطاقة الكهربائية باستعمال طريقة المقارنة بين مختلف النشاطات و مختلف المؤسسات
- البحث عن تركيب أفضل لتوزيع الأعباء المتعلقة بالطاقة الارتكاسية و الغرض من ذلك تخفيض ضياع الطاقة الفعلية بالأسلاك و أجهزة التحويل
- دراية كيفية تحديد الأفضل لمقطع أسلاك الكهرباء

حيث استخلصنا من النتائج التي توصلنا إليها في بحثنا فهي صالحة لا شك للمؤسسات التي هي في طور الاستغلال و يمكن تعميمها إلى كل من المؤسسات التي يمكن أن تكون في حالة إصلاح شبكة التوزيع

الكهربائية أو الاتساع. و نتائج هذا البحث توحى جميعها نحن وصلنا إلي ما نرجو إليه المؤسسات لإنعاش اقتصادها و ابتعادها من الإفلاس.

## RESUME

L'électricité, énergie précieuse, devrait être utilisée à bon escient. Ceci est prouvée par les constructeurs qui ont recours à des méthodes modernes afin d'améliorer l'efficacité des appareils et des procédés pour une réduction des prestations inutiles. Dans ce but, nous avons réussi de réaliser des recherches et des études de cas par des méthodes de recherche théorique et expérimentale pour acquérir de nouvelles connaissances en matière d'utilisation rationnelle de l'électricité dans les éléments d'alimentation des entreprises industrielles.

Il s'agit en particulier de l'élaboration d'un nouveau modèle mathématique de la consommation de l'énergie électrique du broyeur cru, établi dans les conditions de la cimenterie de Ain-Touta Algérie en utilisant la méthode de l'expérience passive. Avec ce modèle, nous pouvons savoir l'économie de l'énergie électrique aux conditions de la consommation optimale.

Sachant que dans la thèse présentée, le champs de recherche sur l'économie d'énergie électrique n'est pas limité uniquement dans les installations technologiques de broyage et de concassage, mais aussi, élargi aux installations électriques des entreprises similaires.

L'application originale que nous avons proposée pour la cimenterie de El-Ma-Labioud Algérie, de la méthode du seuil pour la recherche du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs identiques en parallèle mis en service successivement, est prouvée dans l'article publié récemment objet de la thèse. L'étude menée sur les transformateurs identiques en parallèle mis en service successivement, montre, entre autres, qu'un critère de décision important de passage de un à deux transformateurs est celui de la charge optimale en fonction du rapport entre perte à vide et perte de charge, puissance nominale et le nombre de transformateurs disponibles. Il en ressort que pour une charge moyenne annuelle entre 796.7 et 1380 KVA, deux transformateurs de 1000 KVA mis en service avec un régime parallèle sont les plus rationnels et recouvrent bien les besoins de l'entreprise. Ceux-ci, doivent à l'avenir, contribuer à assurer une économie d'énergie appréciable qui permettra de satisfaire l'entreprise, tout en réduisant leur consommation d'électricité.

Parallèlement, nous avons réalisé d'autres recherches originales, relatives à l'économie d'énergie électrique et plus particulièrement à savoir :

- Proposition d'une nouvelle méthode du choix de l'emplacement des sous stations de distribution d'électricité « Méthode d'équilibre »
- Savoir comment optimiser le système de tarification
- Recherche de l'économie d'énergie électrique par la méthode comparative entre les différentes activités de différentes entreprises
- Recherche de la structure optimale de compensation de l'énergie réactive à l'intention de la diminution de pertes actives dans les lignes et les transformateurs..
- Savoir comment optimiser la section du câble

Les résultats obtenus, sont valables non seulement pour les entreprises en phase d'exploitation mais aussi utiles pour les entreprises en phase de rénovation ou d'extension de leur réseau, d'apporter un soin particulier aux choix financiers qui s'offre à l'entreprise.

## ABSTRACT

Electricity, precious energy, should be used to good knowledge. It is proven by the constructors who have resort to modern methods in order to improve the efficiency of the devices and processes for a reduction of the useless performance. In this goal, we have succeeded in achieving research and studies of cases by methods of theoretical and experimental research to acquire new knowledge concerning the rational use of electricity in the elements of power supplies of the industrial companies.

In particular it's about the development of a new mathematical model of the electric energy consumption of the raw grinder, establishes in the conditions of the cement factory of Ain-Touta Algeria while using the method of the passive experience. With this model, we can know the economy of the electric energy to the conditions of the optimal consumption.

Knowing that in the presented thesis, the field of research on the electric energy economy is not limited solely to the technological installations of grinding and crushing, but also, widespread to the electric installations of similar companies.

The original application we have proposed to the cement factory of El-Ma-Labioud Algeria, of the doorstep method for the research of the rational state of working of the identical transformers in parallel put successively in service, is proven in the article published recently object of this thesis. The survey led on the identical transformers in parallel put successively in service, shows, that an important criteria of decision of passage from one to two transformers is that the of the optimal load function of the ratio of the loss without load to the loss with load nominal power and the number of transformers available. It takes out that for a yearly average load between 796.7 and 1380 KVA, two transformers of 1000 KVA put in service in parallel are the most rational and cover well the needs of the company . These, must in the future, contribute to assure a substantial energy economy that will permit to satisfy the enterprise, while reducing their consumption of electricity.

In the same way, we have achieved some other original research relative to the economy of electrical energy and especially:

- Proposition of a new method of the choice of the site of the substations of distribution of electricity "equilibrium method".
- Knowing how to optimize the system
- Research of the electric energy economy by the comparative method between the different activities of different companies
- Research of the optimal structure of compensation of the reactive energy to the intention of the reduction of active losses in the lines and the transformers..
- Knowing how to optimize the cable section

The results obtained, are not only valid for the enterprises in phase of exploitation but also useful for the companies in phase of renovation or extension of their network, to bring a particular care to the financial that are offered to the company choices.

## **DEDICACES**

Je dédie ce travail à :

- Mes Parents
  
- Mes Frères et Sœurs
  
- Toute la famille KARA,
  
- Tous les amis

## REMERCIEMENTS

Je remercie **Dieu** le tout puissant qui grâce à son aide j'ai pu finir ce travail.

Je tiens à remercier :

- Monsieur : **Haddouche Ali** directeur de thèse qui a voulu m'encadrer tout le long de ce travail.
- Messieurs : **Krapevine Dmitri, Samarine Anatoli, Kovalski Wacclaw** : Directeurs de thèse avec que j'ai commencé mon travail
- Monsieur : **Saâd Salah**, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury de soutenance.
- Messieurs : **Labare Hocine, Benchiba Challali et Bouras Slimane** qui ont voulu faire partie de la commission de soutenance
- Messieurs : **Chain Rabah, Djoumâa , Mâamri Mahmoud**, et tout le personnel de la cimenterie de Ain-Touta, de la cimenterie de El-Ma-Labiod, de la mine de Djebel-El-Onk , de la mine de l'Ouenza et de la mine de Boukhadra pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et leurs aides qu'ils n'ont pas hésité à me fournir
- Enfin tous les professeurs de la section Electromécanique pour leur aide et leur disponibilité

L'esprit humain est souvent si gauche et si mal ajusté dans la carrière de l'invention , que d'abord il se défie de lui même, et puis il se méprise. Car il semble à première vue incroyable qu'une découverte soit réalisée ; puis lorsqu'elle a été faite, il semble incroyable qu'elle ait si longtemps échappé à la quête de l'homme. Tout ceci fournit une bonne raison d'espérer qu'il reste à faire une foule d'inventions, que l'on pourrait tirer, non seulement de la recherche de nouveaux modes opératoires, mais aussi du transfert, de la comparaison et de l'application de ceux déjà connus, par les méthodes que nous avons bien expérimentées.

**Francis Bacon,**

Novum Organum, livre 1.

l'invention dans l'industrie  
de la recherche à l'exploitation

## Liste des Tableaux

Tab	Titre	Page
1.1	Classification des pertes d'énergie électrique selon l'origine	7
1.2	Classification des pertes selon l'enregistrement	8
1.3	Coefficients du modèle de payement d'électricité par EDF	45
1.4	les nouveaux moyens de production en cours de construction et prévus période 2005-2008	51
1.5	Echange de l'énergie avec l'étranger prévus période 2005-2008	51
1.6	Barèmes des Prix Abonnés Moyenne et Haute Tension	55
2.1	Grandeurs mesurées et résultats de calcul des paramètres r et m	85
2.2	Résultats de calcul du paramètre Pvmoy	87
2.3	Résultat de calcul de l'erreur type	88
2.4	Résultats de calcul économique	90
2.5	résultats comparatifs entre les valeurs mesurées et ceux obtenues à l'aide du modèle proposé	90
4.1	Caractéristiques électriques des transformateurs	120
4.2	Economies des coûts	120
4.3	Caractéristiques électriques des transformateurs	124
4.4	Régime de fonctionnement économique des transformateurs de marche en parallèle	124
4.4	Suite Régime de fonctionnement économique des transformateurs de marche en parallèle	125
5.1	Caractéristiques techniques et d'exploitation du transformateur de la sous station de concassage calcaire	113
5.2	Résultats de calcul du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs envisagés mis en service successivement	138
5.3	Economie de puissance réalisée au voisinage de la charge cible	139



## Liste des Figures

Fig	Titre	Page
1.1.	Écart des coûts énergétiques unitaires comparatifs entres sources d'énergie des pays Algérie et Canada	13
1.2.	Diversités des tarifs unitaires d'électricité comparatifs entres mines de différents pays	14
1.3.	Activités souterraines	15
1.4.	Activité en surface	16
1.5.	Activités de l'exploitation à ciel ouvert	17
1.6.	Comparaison de la consommation de l'énergie électrique des activités de concassage entres différentes entreprises des mines et de ciment de différents pays Algérie et Canada.	18
1.7.	Comparaison de la consommation de l'énergie électrique des activités de broyage entres différentes entreprises de ciment de l'Est Algérien.	19
1.8.	Comparaison de la consommation de l'énergie électrique entres les différentes activités de la mine de phosphate de Djebel El Onk	20
1.9.	Nomogramme de la tension d'alimentation et de distribution en fonction de la puissance à transporter et de la distance de transport.	25
1.10.	Réseau maillé	26
1.11.	Réseau radial	27
1.12.	Réseau arborescent	27
1.13.	Choix de l' emplacement de la sous station principale	30
1.14	Représentation graphique des pertes théoriques d'un transformateur principale de la sous station principale de la cimenterie de Ain-Touta de puissance de 30 MVA	36
1.15	Délestage de la charge	37
1.16	Déplacement de la charge	38
1.17	Caractéristique de la variation du facteur de puissance en fonction de la charge [79]	39
1.18	Graphique de remplacement des moteurs [15]	40
1.19	Historique de consommation électricité 1995-2004	48
1.20	Evolution de la consommation 2006-2015	49
1.21	Evolution de la production national 2006-2015	49
1.22	Evolution de la puissance maximale appelée 2006-2015	50
1.23	Hypothèse d'évolution des pertes distribution et transport 2006-2015	50
1.24	Tarif série 30 Abonnée Haute tension énergie consommée	56
1.25	Tarif série 40 Abonnée Moyenne tension énergie consommée	56
2.1	Courbe de fonctionnement normale Avec charge nivelée	64
2.2	courbe de fonctionnement avec charge de pointes	64
2.3	Courbe de charge et surcharge cyclique en fonction de la Puissance nominale cas du transformateur immergé	66
2.4	Courbe de charge et surcharge cyclique en fonction de la Puissance	66

	nominale cas du transformateur à sec	
2.5	Courbe de surcharge brèves admissibles transformateur immergé	66
2.6	Courbe de surcharge brèves admissibles transformateur à sec	66
2.7	Relation entre les dépenses spécifiques et la productivité annuelle	73
2.8	Courbe du rendement en fonction de la puissance apparente transmise et du facteur de puissance	75
2.9	Courbe du rendement en fonction de la puissance apparente transmise et du facteur de puissance constant $\cos\theta = 1$	76
2.10	Caractéristiques électriques d'une machine	78
2.11	Relation entre la masse du fer, les pertes et la puissance de la machine	80
2.12	Relation entre la masse du fer et la puissance spécifique de la machine	80
2.13	Variation de l'énergie spécifique consommée en fonction du débit de la matière première à broyer d'un broyeur cru de puissance 3000 KW et de capacité 145 à 175 t/h pour obtenir le minimum de pertes.	91
3.1	Algorithme d'optimisation méthode et modèle sont indépendants	98
3.2	Algorithmes d'optimisation modèle et méthode résolus simultanément	99
4.1	Schéma d'alimentation d'un réseau électrique avec un compensateur synchrone	107
4.2	Exemple de couplage double étoile	108
4.3	Exemple de couplage triangle	108
4.4	.Compensation aux bornes d'un transformateur pour accroître sa puissance disponible schéma de compensation	111
4.5	schéma de compensation dans les réseaux perturbé par les harmoniques	112
4.6	Aperçu et évaluation des différents aciers magnétiques [82]	117
4.7	Détermination graphique des points de fonctionnement économique entre deux transformateurs respectivement de puissance 1000 et 1600 KVA de la sous station de broyage de la cimenterie de El-Ma-Labiod	125
4.8	choix de l'option du tarif	127
5.1	Section économique	129
5.2	Dépendance des pertes par effet joules en fonction du facteur de puissance et le facteur de charge de la ligne de transport reliant la cimenterie de El-Ma-Labiod au poste de distribution de El-Hammamet	130
5.3	Algorithme d'optimisation des pertes de puissance Méthode Black box	137
5.4	Relation de la variation des pertes de puissance en fonction de la puissance transmise de trois transformateurs identiques, mis en service successivement pour obtenir le minimum de perte	139
5.5	Schéma de distribution de l'énergie électrique avec différents disposition des moyens de compensation de l'énergie réactive	142
5.6	Schéma équivalent de calcul de l'énergie réactive et du potentiel économique	143
5.7	.Régime économique des moyens de compensation de l'énergie réactive	150

--	--	--

## Table des matières

<b>Introduction</b> .....	1
<b>But de la recherche</b> .....	3
<b>Problème posé</b> .....	5
<b>CHAPITRE 1</b> .....	6
1. Analyse des possibilités de l'économie de l'énergie électrique à l'époque actuelle ...	6
1.1. Classification des pertes d'énergie électrique.....	6
1.1.1. Classification des pertes d'énergie électrique selon l'origine.....	6
1.1.2. Classification des pertes d'énergie électrique selon l'enregistrement.....	7
1.1.3. Pertes industrielles .....	9
1.2. Organisation de la consommation de l'énergie électrique dans l'industrie minière algérienne.....	11
1.2.1. Introduction.....	11
1.2.2. Coûts énergétiques de l'exploitation du secteur minier .....	11
1.3. Analyse des méthodes contemporaines de la réduction des pertes et de l'optimisation de la consommation de l'énergie électrique dans le secteur minier .....	12
1.3.1. Analyse comparative de la consommation d'énergie électrique des mines souterraines .....	12
1.3.2. Analyse comparative de la consommation d'énergie électrique des mines à ciel ouvert.....	17
1.3.3. Conclusion.....	21
1.4. Voies possibles et moyens pour économiser l'énergie électrique.....	21
1.4.1. Choix des paramètres rationnels des éléments du système d'alimentation des entreprises en phase de construction ou d'extension .....	22
1.4.2. Recherche des possibilités de réduire la consommation d'énergie électrique des entreprises en phase d'exploitation.....	36
1.5. Etude de l'influence du système tarifaire sur l'économie d'énergie électrique.....	41
1.5.1. La tarification à la Ramsay "tarification linéaire" .....	41
1.5.2. La tarification non linéaire.....	42
1.5.3. La tarification linéaire et non linéaire en pratique.....	42
1.5.4. Structure de la nouvelle tarification appliquée en Algérie.....	47
1.5.5. Conclusions.....	57
<b>CHAPITRE 2</b> .....	59
2. Indices de la consommation de l'énergie électrique.....	59
2.1. Etude des méthodes de calcul du bilan électrique des entreprises.....	59
2.1.1. Bilan de puissance.....	59
2.1.2. Choix final de la puissance du transformateur.....	64
2.1.3. Surcharges des transformateurs.....	65
2.2. Principaux indices de la consommation de l'énergie électrique.....	67
2.2.1. Facteur de puissance moyen comme indice principal de consommation.....	67
2.2.2. Dépenses spécifiques d'énergie électrique.....	68

2.2.3. Degré d'approvisionnement en énergie du travail.....	69
2.2.4. Minimisation des dépenses réduites relatives aux installations électriques et de production.....	69
2.2.5. Maximisation du rendement. ....	74
2.2.6. Optimisation du facteur de charge .....	81
2.2.7. Établissement d'un modèle mathématique de la consommation d'électricité du broyeur cru.....	82

### **CHAPITRE.3**.....92

3. Méthodes de l'optimisation de la consommation de l'énergie électrique dans les éléments du système d'alimentation.....	92
3.1. Méthodes de recherches des modèles.....	92
3.1.1. Recherches Analytique.....	93
3.1.2. Recherches expérimentales.....	94
3.2. Méthodes d'optimisation.....	95
3.2.1. Méthode de Seuil.....	96
3.3. Algorithme d'optimisation.....	97
3.3.1. Méthode Black Box.....	97
3.4. La procédure pour simuler et optimiser les systèmes énergétiques.....	100

### **CHAPITRE 4**.....101

4. Mesures techniques technologiques et organisationnelles de la régularisation de la consommation de l'énergie électrique.....	101
4.1. Classification des mesures d'organisation, de planification et de régularisation de la consommation de l'énergie électrique.....	101
4.1.1. Les sources d'économie d'énergie.....	101
4.1.2. Potentiel de gains énergétiques et rentabilité.....	101
4.1.3. Étapes de réalisation du diagnostic.....	102
4.2. Révélation des consommateurs régulateurs de l'énergie consommée dans les unités de ciments.....	103
4.3. Application de la compensation de l'énergie réactive à l'intention de la diminution des pertes .....	103
4.3.1. Compensation de la puissance réactive.....	103
4.3.2. Méthodes de compensation.....	105
4.4. Expertise des possibilités de mise en pratique des mesures recommandées pour l'amélioration de l'efficacité énergétiques des entreprises.....	113
4.4.1. Amélioration de l'efficacité énergétiques des Cimentières.....	113
4.4.2. Choix des transformateurs .....	115
4.4.3. Recherche du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs.....	121
4.5. Tarification de l'énergie électrique.....	126
4.5.1. Choix de l'option du tarif.....	126
4.5.2. Conclusion.....	127

### **CHAPITRE 5**.....128

5. Economie de l'énergie électrique aux conditions de la consommation optimale... ..	128
5.1. Economie d'énergie dans les lignes de transport et de distribution.....	128
5.1.1. Première possibilité pour économiser de l'énergie dans les lignes.....	128
5.1.2. Deuxième possibilité pour économiser de l'énergie dans les lignes .....	129
5.1.3. Troisième possibilité pour économiser de l'énergie dans les lignes .....	131

5.1.4. Conclusion.....	132
5.2. Economie d'énergie dans les transformateurs	
5.2.1. Recherche du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs	
- Méthode de seuil.....	133
5.3. Economie de l'énergie active lors du passage de l'énergie réactive.....	140
5.3.1. critères de choix.....	141
5.3.2. Analyse du réseau de compensation .....	142
5.3.3. Analyse du réseau de compensation -Méthode de comparaison.....	144
5.3.4. Analyse du circuit de compensation	
Méthode de potentiel économique	
5.3.5. Analyse du régime économique de compensation par la	
méthode graphique « compensation par fragment ».....	150
5.4. Etablissement de la caractéristique énergétique du concasseur type à marteau	
de la cimenterie de Ain- Touta Méthode $\Pi$ théorème.....	152
<b>Conclusion</b> .....	152
<b>Conclusions et propositions</b> .....	153
<b>Conclusion générale</b> .....	158
<b>Annexe</b> Elaboration d'un programme informatique de la recherche du régime	
rationnel de fonctionnement des transformateurs – méthode de Seuil...	160
<b>Bibliographie</b> .....	161

## Liste des Symboles

- $W_s$  : les pertes d'énergie électrique industrielle par tonne de minerai extrait,  $KWh/t$
- $W_c$  : la consommation mensuel d'énergie,  $KWh/mois$  ;
- $W_p$  : la consommation planifiée,  $KWh/mois$  ;
- $Q_p$  : la production planifiée,  $t/mois$
- $W_u$  : la consommation utile,  $KWh$
- $W_n$  : les pertes nominales,  $KWh$
- $W_{sup}$  : les pertes supplémentaires,  $KWh$
- $C_{EU}$  : le coût énergétique par tonne de minerai extrait,  $DA/t$
- $C_{UN}$  : la consommation énergétique par tonne de minerai extrait,  $KWh/t$
- $P_{UN}$  : le coût unitaire de l'énergie consommée,  $DA/KWh$
- $C_s$  : l'indice énergétique de l'entreprise,  $KWh/t$
- $Pl$  : la puissance active transmise par les lignes,  $KW$
- $Z$  : l'impédance de la ligne  $K\Omega$
- $L_t$  : la distance de transport,  $KM$
- $U_L$  : tension de la ligne,  $KV$
- $kr$  : facteur de régulation
- $U_n$  : tension normalisée,  $KV$
- $\Delta W$  : économie de puissance électrique,  $KW$
- $\Gamma$  : la résistivité du conducteur à la température  $T^\circ = 20^\circ C$ ,  $\Omega m$
- $I_1, I_2, q_1 et q_2$  : Respectivement, les valeurs des courants et des sections des fils avant et après la conversion à la tension plus élevée,  $A, m^2$
- $D_g et D_d$  : dépenses minimales d'investissement et d'exploitation à gauche et à droite de la sous station de distribution d'électricité,  $DA$
- $R_g et R_d$  : réserves du minerai se trouvant à gauche et à droite de la sous station de distribution d'électricité, tonne
- $G$  : la sous station principale de distribution
- $G_g et G_d$  : respectivement les sous stations secondaires se trouvant à gauche et à droite de la sous station principale  $G$
- $U_g et U_d$  : respectivement les tensions appliquées aux réseaux se trouvant à gauche et à droite de la sous station principale  $G$ ,  $KV$
- $S_g et S_d$  : respectivement les puissances apparentes transmises des sous station secondaires se trouvant à gauche et à droite de la sous station principale  $G$ ,  $KVA$
- $L_{g-d}$  : distance séparant les sous station secondaires,  $m$
- $dg$  : distance optimale séparant la sous station secondaire  $G_g$  de la sous station principale  $G$ ,  $m$
- $\alpha_{g-d}$  : gisement de la ligne  $L_{g-d}$  (angle formé entre le nord  $N$  et la ligne  $L_{g-d}$ )
- $D_{S_g} et D_{S_d}$  : respectivement les dépenses spécifiques du réseau se trouvant à gauche et à droite de la sous station principale  $G$ ,  $DA/t$
- $X_g et Y_g$  : respectivement les coordonnées de l'emplacement de la sous station

secondaire( $G_g$ ) se trouvant à gauche de la sous station principale ( $G$ )

$X_p$  et  $Y_g$  : respectivement les coordonnées de l'emplacement de la sous station principale ( $G$ )

$P_{fe}$  : pertes dans le fer, W

$P_{cu}$  : pertes dans le cuivre, W

$R_L$  : résistance électrique de la ligne,  $\Omega$  ;

$I$  : le courant de charge de la ligne, A ;

$S_L$  : la puissance apparente transmise par les lignes, KVA ;

$w$  : les pertes de puissance dues à la charge, KW

$P_v$  : les pertes de puissance dans le circuit magnétique au régime à vide dues au régime, W ;

$P_{cc}$  : les pertes de puissance dans le circuit électrique au régime de court-circuit, W ;

$S_N$  : la puissance nominale du transformateur, KVA.

$S_c$  : la puissance apparente transmise par transformateur, KVA

$P_t$  : Les pertes totales de puissance d'un transformateur, KW

$T$  : le tarif monôme de l'énergie électrique, DA/mois

$P_r$  : Prix unitaire de l'énergie consommée, DA/KWh

$W$  : Energie active consommée, KWh

$f_i$  : Représente une charge fixe

$P_i, r_i$  et  $s_i$  : Représentent des charges variables, chacune afférente à une caractéristique différente du service.

$F$  : le tarif polynôme de l'énergie électrique, DA/mois

$a$  : Tarif d'abonnement constant

$e$  : Prix unitaire \$/ KWh suivant la consommation

$P_{Souscrite}$  : la puissance souscrite, KW

$a_2, b, \tau, c, \alpha$  : représentent les coefficients du modèle de paiement

$\tau$  : le taux d'utilisation du temps

$E_{Soutirée}$  : l'énergie soutirée, KWh

$D$  : la durée de l'année, heures

$CMDPS$  : les dépassements de puissance, KW

$\Delta P$  : les dépassements de puissance souscrite, KW

$E_i$  : Désigne l'énergie active soutirée pendant la  $i^{ième}$  classe temporelle, exprimée en kWh.

$d_i$  : Coefficient pondérateur de l'énergie, c€/KWh

$P_{Souscrite.Pondérée}$  : Désigne la puissance souscrite pondérée, KW

$k_i$  : Coefficient pondérateur de puissance de la  $i^{ième}$  classe temporelle, %

$e_0$  : Prix d'équilibre

$m$  : Coefficient strictement positive

$m_1, m_2, m_3, m_4$  : Coefficients strictement positives respectivement de chaque niveau de tarif proposé.

$d$  : le prix unitaire de la puissance absorbée, DA/KW/Mois ;

$Pa$  : la puissance maximum absorbée par l'abonné durant la période de facturation et qui est donnée par un appareil indicateur de puissance équipant le panneau de comptage, KW.

$c_c$  : le prix unitaire, DA/KW/Mois

$P_c$  : la puissance mise à disposition, KW

$eh_i$  : le prix unitaire de l'énergie active pour le poste horaire  $h$ , CDA/KWh et dont le prix est différencié par période de la journée

$Eh_i$  : l'énergie active consommée au cours du mois dans le poste horaire h ,  
 KWh/Mois;  
 E : l'énergie active consommée au cours du mois, KWh/Mois ;  
 Q : l'énergie réactive consommée au cours du mois, KVArh/Mois ;  
 r : la valeur du rapport qui correspond au facteur de puissance normatif fixé par la  
 SONELGAZ ( $\cos\varphi = 0.894$ )  
 g : le prix unitaire de l'énergie réactive, CDA/KVArh  
 $Q_{opt}$  : consommation optimale de la puissance réactive, KVA  
 $P_a$  : la puissance active du groupe de consommateurs, KW  
 $P_{Nl}$  : la puissance nominale du consommateur, KW ;  
 n : le nombre de consommateurs ;  
 $Q_r$  : la puissance réactive du groupe de consommateurs, KVA ;  
 $tg\varphi_m$  : correspond au facteur de puissance moyen  $\cos\varphi_m$  du groupe de consommateurs  
 $\cos\varphi_i$  : représente le facteur de puissance nominal du  $i^{ème}$  consommateur  
 $K_d$  : facteur de demande  
 $P_{Nmax}$  : la puissance du consommateur le plus puissant dans le groupe, KW  
 $W_a$  : l'énergie active consommée pendant une période déterminée, KWh/ans  
 $w_s$  : la consommation spécifique minimale étalonnée, KWh/Unité de produit ;  
 A : la production annuelle de l'entreprise, tonnes/an  
 $T_e$  : le temps de l'emploi de la charge maximale par année  
 $X_2$  : Propriété technologique (granulométrie de la roche à concasser, m)  
 $X_3$  : Propriété mécanique (résistance limite au cisaillement de la roche)  
 $n_{ef}$  : représente le nombre effectif de consommateurs  
 $P_m$  : la puissance moyenne consommée pendant une période déterminée, KW  
 $K_u$  : coefficient d'utilisation  
 $K_{max}$  : facteur de maximum  
 $P_{aMa}$  et  $P_{aMin}$  : représentent respectivement la puissance active maximal et minimale appelées  
 par le groupe de consommateurs, KW  
 $\beta$  : Coefficient tenant compte du rapport du temps du maximum adopté de la charge  
 électrique ( $T_{Max}$ ) au temps de la période déterminée  
 $K_f$  : Coefficient de forme du graphique de la charge électrique  
 $P_{mq}$  : Représente la puissance moyenne quadratique pendant une période déterminée, KW.  
 $S_a$  : la puissance apparente appelée, KVA  
 $K_s$  : coefficient de simultanéité  
 $\eta$  : le rendement  
 Pcon : la puissance maximale consommée, kW  
 Put : la puissance maximale utilisée, kW  
 $P_{Max}$  : la valeur la plus élevée entre la puissance utilisée et consommée, KW  
 $I_n$  : le courant nominal, A  
 $V_r$  : l'énergie réactive consommée pendant une période déterminée, KVAr/mois  
 $D_r$  : tarif de l'énergie réactive, DA



$R$  : Résistance du conducteur,  $\Omega$  ;  
 $X$  : Réactance du conducteur,  $\Omega$   
 $P$  : Puissance active transmise, KW  
 $Q$  : Puissance réactive transmise, KVAR  
 $U$  : Tension appliquée, V  
 $I$  : Le courant traversant le conducteur, A  
 $\Delta V$  : les chutes de tensions, V  
 $\Delta P_c$  : les pertes par effet joules dans le câble, KW  
 $\Delta P_{tr}$  : les pertes par effet joules dans le transformateur, KW  
 $a_{et}$  : degré d'approvisionnement en énergie du travail, KWh/hh  
 $n_p$  : Nombre du personnel titulaire  
 $T_p$  : Durée du poste, h ;  
 $N_j$  : Nombre de journée de travail par mois, Jours/mois ;  
 $hh$  : Unité de mesure du degré d'approvisionnement, hommes heures  
 $Z$  : dépenses réduites, DA  
 $f(k)$  : dépenses d'investissement, DA  
 $c(P)$  : dépenses d'exploitation, DA  
 $k$  : Dépenses d'investissement, DA ;  
 $\theta$  : Norme d'amortissement ;  
 $P_{norm}$  : Coefficient normatif de l'efficacité économique ;  
 $\Delta P$  : Pertes de puissance, KW ;  
 $T_a$  : Nombre des heures de travail effective par an, h/an ;  
 $Co$  : Prix unitaire de l'énergie électrique , DA/KWh.  
 $wa$  : Energie électrique consommée , KWh/an  
 $ym$  : Dommage spécifique moyen , DA/KWh ;  
 $k_1$  et  $k_2$  : Coefficients qui dépendent du type de consommateur ;  
 $\mu m.et.\mu m q$  : Représentent, respectivement les déviations de la tension moyenne et de la  
moyenne quadratique sur les jeux de barre des consommateurs  
 $q'$  : Coefficient qui représente les dépenses spécifique relatives aux pertes d'énergie  
électrique non lié à la productivité de l'entreprise, DA/t ;  
 $q''$  : Coefficient qui dépend du degré de variation des pertes d'énergie électrique au fur et à  
mesure de l'augmentation de la productivité de l'entreprise, DA/an ;  
 $k'$  : Coefficient qui représente les dépenses spécifiques relatives aux investissements et qui  
dépend de la productivité de l'entreprise, DA/t ;  
 $k''$  : Coefficient qui représente les dépenses relatives à l'investissement non lié à la  
productivité de l'entreprise, DA/an  
 $n_v$  : Durée de vie de l'entreprise, ans  
 $Z_s$  : dépenses spécifiques, DA/unité de production  
 $Q_i$  : réserves industrielles, tonnes  
 $A_{opt}$  : la production optimale, tonnes  
 $Z_{s\ min}$  : dépenses spécifiques minimales, DA/tonne  
 $E_s$  : le gain spécifique, DA/t  
 $P_u$  : la puissance utile, KW  
 $S_c$  : Puissance apparente transmise par l'installation électrique, KVA  
 $a_0$  : désignant le facteur de puissance  
 $b_0$  : désignant un coefficient de proportionnalité ;

$c_0$  : pertes indépendante de la charge, W  
 $f$  : fréquence, Hz  
 $S_{opt}$  : la charge optimale, KVA  
 $\eta_{max}$  : le rendement maximal  
 $\eta_{Prat}$  : le rendement pratique  
 $W_u$  : Energie utilisée, KWh ;  
 $W_a$  : Energie absorbée (payée)  
 $t$  : le temps de fonctionnement heures  
 $S_{th}$  : la puissance thermique, KW  
 $S_0$  : la puissance instantanée, KW  
 $m$  : dimension linéaire, m  
 $k_H$  : Coefficient qui dépend de la qualité des tôles ;  
 $B_m$  : Induction magnétique, Tesla ;  
 $\rho$  : Résistivité,  $\Omega m$  ;  
 $e$  : Epaisseur des tôles, mm ;  
 $V$  : Volume du fer,  $m^3$   
 $S$  : Puissance apparente calculée de l'installation électrique, KVA ;  
 $K$  : Coefficient qui dépend du métal ;  
 $\mu$  : Densité du métal,  $kg/m^3$  ;  
 $J$  : Densité du courant,  $A/m^2$  ;  
 $M$  : La masse du fer.  
 $S_s$  : la puissance de la machine rapportée à 'unité de masse, KVA/Kg  
 $n_c$  : facteur de charge  
 $n_{opt}$  : facteur de charge optimal  
 $S_{c_{opt}}$  : la charge optimale, KVA  
 $P_{V_b}$  : Consommation d'énergie électrique du broyeur au régime à vide, KWh/h.  
 $P_{C_b}$  : Consommation d'énergie électrique du broyeur au régime en charge, KWh/h  
 $B_b$  : Charge des corps broyant, t ;  
 $B_u$  : Diminution de masse des corps broyant à cause de l'usure, t ;  
 $D_b$  : Quantité de la matière première qui s'écoule à travers le broyeur, t ;  
 $T_b$  : Temps de fonctionnement du broyeur, h ;  
 $P_{V_b}, R_b, r_b$  et  $m_b$  : Sont des grandeurs constantes qui caractérisent la forme du modèle  
proposé  
 $g_b$  : coefficient de corrélation linéaire  
 $f_b$  : le nombre de degrés de liberté  
 $P_{t_b}$  : la consommation totale du broyeur, KWh/h  
 $P_{t_b s}$  : la consommation spécifique du broyeur, KWh/t  
 $P_{cs}$  : l'énergie spécifique du régime en charge, KWh/t  
 $P_{avs}$  : l'énergie spécifique du régime à vide  
 $Q_{b_{opt}}$  : la charge optimale du broyeur, tonne  
 $P_{t_b s_{min}}$  : la consommation spécifique minimale du broyeur, KWh/tonne  
 $E_b$  : le gain réalisé, KWh/tonne  
 $E_{br}$  : le gain relatif à l'énergie spécifique, %

$m_p$  : représente le nombre des paramètres qui influent sur le phénomène étudié ;  
 $k_p$  : représente le nombre des unités de mesures principales  
 $\Pi_i$  : représente le critère d'ordre i  
 $X_1, X_2, \dots, X_n$  : Respectivement les paramètres de perfectionnement  
 $W_{s\text{ Objectif}}$  : représente la fonction du but  
 $Q_{\text{élément}}$  : représente la variable indépendante  
 $I_{\text{Inégalité}}$  : représente les contraintes du modèle  
 $S_r$  : la sensibilité de la rentabilité, DA/KWh  
 $C_I \text{ et } C_{EC}$  : Respectivement représentent les coûts d'investissement et des énergies consommées  
 $L$  : l'inductance de la bobine, Henry  
 $C_{con}$  : la capacité du condensateur, farad  
 $\omega$  : la pulsation, r/s  
 $X$  : la réactance,  $\Omega$   
 $Z$  : l'impédance,  $\Omega$   
 $U_L \text{ et } U_C$  : respectivement la tension au borne de la réactance inductive et capacitive, V  
 $I_{CS}$  : le courant généré par le compensateur synchrone, A  
 $V_{CS} \text{ et } V_r$  : respectivement la tension au borne du compensateur et au borne du réseau, KV  
 $X_s$  : la réactance synchrone,  $\Omega$   
 $I_{EX}$  : le courant d'excitation A  
 $S_{CS}$  : la puissance réactive générée par le compensateur synchrone, KVA  
 $Q_C$  : la puissance de compensation de l'installation, KVA  
 $q_{CS}$  : représente la puissance d'un condensateur , KVA ;  
 $U_C$  : représente la tension de service , KV  
 $n_{cs}$  : le nombre de condensateur  
 $G_h$  : puissance de tous les générateurs d'harmoniques alimentés par le même jeu de barres que les condensateurs.  
 $S_{cc}$  : puissance de court-circuit réelle, KVA  
 $\Delta P_C$  : la perte de charge du préchauffeur  
 $k_X$  : coefficient de proportionnalité des pertes de charge du préchauffeur  
 $T_{CC_{Pertes}}$  : le coût des pertes actualisé dans le temps, DA  
 $C_{CC_{Achat}}$  : le prix d'achat actualisé dans le temps, DA  
 $h$  : le taux d'actualisation estimé, %  
 $H$  : la durée de vie estimée du transformateur, ans  
 $E_{Pertes}$  : Les pertes d'énergie , KWh ;  
 $C_{NC_{Achat}}$  : Le coût d'achat non capitalisé, DA  
 $C\tau$  : le coût global du cycle de vie , DA  
 $\Delta I_{I+1, I}$  : Représente la différence entre les investissements respectivement du transformateur d'ordre I+1 et I  
 $\Delta E_{I+1, I}$  : Représente la différence entre les pertes d'énergie respectivement du transformateur d'ordre I+1 et I  
 $H_r$  : le délai de rentabilité du transformateur , ans  
 $H_{r_{I+1, I}}$  : le seuil de rentabilité du transformateur i et i+1, ans

$H$  : la durée de vie prévue du transformateur, ans  
 $E_{con}$  : l'économie réalisée, DA  
 $Sc_{e,1,2}$  : la charge de fonctionnement économique des transformateur 1 et 2 , KVA  
 $Sc_i$  : la part de charge de chaque transformateur, KVA  
 $Scr$  : la charge réelle, KVA  
 $P_{tr}$  : les pertes réelles, KW  
 $Scl_1$  : la charge limite relative au transformateur le moins puissant, KVA  
 $P_{tl_1}$  : les pertes limites, KW  
 $P_{min}$  : les pertes minimales ,KW  
 $Ee$  : Economie espérée, KW  
 $P_{CON}$  : Le prix d'achat du conducteur, DA/KM  
 $F_C$  et  $G$  Sont des constantes de prix du câble  
 $s$  : la section du câble,  $m^2$   
 $C_{tot}$  : dépenses réduite du câble, DA  
 $A_n$  : Représente l'annuité d'amortissement du prix d'achat du câble  
 $N$  : Nombre de conducteurs  
 $\sigma$  : La résistivité du conducteur  $\Omega mm^2 / KM$   
 $Se$  : La section économique du conducteur,  $mm^2$   
 $Lc$  : La longueur du conducteur, KM  
 $Q_{ril}$  et  $Q_{rcl}$  : respectivement représentent la puissance réactive absorbée et générée par la ligne, KVAr  
 $P_t$  : les pertes totales de puissance dans le transformateur, W  
 $P_{t_{n-1}}$  et  $P_{t_n}$  : représentent respectivement les pertes totales de n-1 et de n transformateurs fonctionnant en régime parallèle, KW  
 $Ep$  : économie de puissance réalisée au voisinage de la charge cible, KW  
 $Q_{CSOM}$  : Puissance réactive sommaire fournie par les moyens de compensation, KVAr ;  
 $Q_{BHC}, Q_{BBC}$  : Puissance des batteries de condensateurs respectivement installées du côté haute et basse tension, KVAr ;  
 $Q_{SM}$  : Puissance réactive fournie par les moteurs synchrones, KVAr ;  
 $Q_e$  : Puissance de charge totale d'entrée, KVAr ;  
 $Q_C$  : Puissance réactive calculée de l'installation, KVAr ;  
 $\Delta Q$  : Pertes de puissance réactive , KVAr  
 $D_{ra}$  : Dépenses réduites annuelles sur le payement de l'énergie et sur les dispositifs de compensation, DA/an  
 $a_{ij}, b_i$  : Coefficients d'approximation  
 $D_0$  : Dépenses annuelles indépendamment de la charge réactive, DA/an  
 $C_0$  : Coût des pertes d'énergie,  
 $Q_0$  : Pertes fixes qui dépendent du courant magnétisant à vide  $I_0$   
 $d_p$  : Coefficient de pertes  
 $D_0m$  : Dépenses sue m batteries de condensateurs  
 $D_{BBC}, D_{BHC}$  : Dépenses unitaires respectivement des batteries de compensation installées du côté basse et haute tension.

$D_{SI}$  et  $D_{SF}$  : représentent respectivement les dépenses spécifiques relatives aux investissements et à la facturation de l'énergie réactive , DA/KVAr  
 $D_{min}$  : le minimum des dépenses réduites  
 $D_{Pertes}$  : Dépenses relatives aux pertes de puissance active provoquées par le passage de la puissance réactive, DA  
 $D_{IComp}$  : Dépenses relatives aux investissements de l'installation de compensation , DA  
 $D_{SC}$  : Dépenses spécifiques relatives à la batterie de condensateur, DA/KVAr  
 $\Delta P_Q$  : Pertes de puissance active provoquées par le passage de la puissance réactive générée par les condensateurs , KW  
 $Q_{COPT}$  : la charge réactive optimale, KVAr  
 $\Delta P_{QMS}$  : Pertes de puissance active provoquées par le passage de la puissance réactive générée par le moteur synchrone , KW  
 $E_{BBH}, E_{BBC}$  : représentent respectivement les potentiel économique de la batterie de condensateur du côté haute et basse tension  
 $Q_{eNor}$  : la puissance réactive d'entrée normative, KVAr  
 $d_f$  : Diamètre du morceau après concassage, m  
 $\Psi$  : Masse volumique,  $kg/m^3$   
 $g_f$  : Accélération de la pesanteur ,  $m/s^2$   
 $D_G$  : Diamètre du morceau maximale avant le concassage, m  
 $Q_d$  : Débit de la matière, kg/s  
 $\zeta_r$  : Propriété de la roche ,  $kg/ms^2$   
 $T_{ORG}$  : temps de percussions, s  
 $V_0$  : Volume de la chambre, du concasseur,  $m^3$   
 $V_v$  : quantité du vide de la chambre du concasseur,  $m^3$   
 $\alpha$  : Représente le pourcentages des fines dans le tout venant, %  
 $Kt$  : Rapport entre le temps de chute et le temps entre deux percussions  
 $K_{RCC}$  : Coefficient de remplissage de la chambre de concassage  
 $P_{avCON}$  : Représente les pertes à vides du concasseur, KWh

## Introduction :

L'électricité est un produit de consommation courant, indispensable mais aussi un produit élaboré et technique. L'électricité ne se stocke pas, sauf en très petites quantités (exemple : batteries) [1-2]. Cette caractéristique a pour conséquences

- la nécessité d'adapter en permanence l'offre de la production aux demandes de consommation d'énergie.
- l'impossibilité de constituer des " réserves " en quantité industrielle
- l'énergie produite doit être transportée à l'instant jusqu'aux consommateurs.

Toutefois, au cours de ces processus, surviennent des pertes non négligeables (pertes techniques et pertes non techniques ) dans les éléments du réseau (lignes et transformateurs ...etc.), dont il est utile de connaître les causes, afin de prendre toutes dispositions propres à les réduire[3-6].

Il est connu du principe théorique et de l'expérience que la rentabilité d'une installation industrielle est directement liée à la disponibilité de l'outil de production. Par contre les réseaux électriques livrent l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'outil de production. Ainsi, la continuité d'alimentation des récepteurs est recherchée dès la conception du réseau et en particulier lors des choix préliminaires du schéma unifilaire. Donc, Il s'agit d'élaborer un schéma unifilaire préliminaire qui réponde aux besoins et aux contraintes, et qui tienne compte de l'ensemble des données relatives à l'identification des problèmes, des besoins à satisfaire et des contraintes imposées [7].

La conception d'un réseau électrique a pour objectif de déterminer l'installation électrique satisfaisant les exigences du processus industriel au moindre coût d'investissement, d'exploitation et de défaillance.

Il s'agit donc d'une étude de validation et d'optimisation technico-économique de l'architecture envisagée prenant en compte l'ensemble des données et hypothèses. Elle nécessite des calculs de réseaux (flux de puissance, courants de court-circuit, ...). Cette étude est élargie aussi au choix et réglage des dispositifs d'exploitation et de protection permettant la détection et l'élimination des défauts et de déterminer leurs réglages et au choix et mise en place d'un système de contrôle commande permettra aux exploitants de conduire et surveiller le réseau et dans lequel seront implantés les automatismes optimisant le coût et la disponibilité de l'énergie :

- les transferts de sources
- les délestages / relestages
- les reconfigurations automatiques de boucles de distribution

En référant à l'industrie des mines et des ciments Algériennes et sur les études bibliographiques [8-12], la consommation de l'énergie électrique subisse de fortes variations dans le temps et représente un des coûts les plus importants du produit et varie beaucoup d'une usine à l'autre et selon les pays considérés.

D'ici découle , que les économies d'énergie électrique suscitent un intérêt croissant dans l'industrie des mines et des ciments. En effet, la dépense en électricité peut représenter 50% de l'ensemble des coûts d'énergie nécessaire à la production d'une tonne de ciment. Par ailleurs, l'énergie représente 30 à 40% du prix de revient du ciment (hors frais d'amortissement), dont 80% de l'énergie utilisée pour la fabrication d'une tonne de ciment est dépensée pour la fragmentation des matériaux de construction, c'est-à-dire pour le concassage et le broyage [13-23].

Par conséquent le choix rationnel des installations de concassage et de broyage aussi bien les lignes et les transformateurs de distribution d'électricité débitant des charges élevées augmentées des pertes considérables et l'optimisation de leurs régimes de fonctionnement représentent un facteur important d'économie d'énergie pour ce secteur [24-29] et qui sera l'objet de la recherche, dont l'intitulé "*ECONOMIE D'ENERGIE ELECTRIQUE*".

Conscient de l'importance du problème et après discussion avec les spécialistes de l'industrie des mines et des ciments, le facteur des pertes d'énergie électrique apparaît comme un axe prioritaire de sa recherche.

Se basant sur cette hypothèse pratique, nous avons essayé de cerner le problème par différentes méthodes de recherche théorique et expérimentale[ 30-37], basées sur les conditions réelles de la cimenterie de Ain-Touta et élargies aux conditions de la cimenterie de El-Ma-Labioud et aux entreprises similaires où les conditions de recherche et d'application sont possibles.

## **But de la recherche :**

Dans la présente recherche, nous avons jugé utile et nécessaire d'élaborer des modèles mathématiques de la consommation optimale de l'énergie électrique relatives aux installations électriques de transformation et de compensation et aux installations de broyage de la matière première dans les conditions des unités de recherche principales (la cimenterie de Ain-Touta, la cimenterie de El-Ma-Labioud et la mine de Djebel-El-Onk ) ou les conditions d'application sont favorables et d'établir des normes de consommation d'énergie pour ces installations.

Selon la méthode japonaise, établie récemment par le chercheur Taguchi[38] : énonce que tout produit dont la caractéristique de performance est différente de la valeur cible entraîne une perte de qualité. D'ici découle que les réserves de l'économie d'énergie électrique, ne peuvent être trouver qu'à partir d'une norme établie d'avance. Cette norme est établie en vertu de l'analyse théorique et expérimentale des caractéristiques des installations étudiées.

D'ailleurs, c'est l'unique méthode qui nous permet de savoir toutes les voies possibles de l'économie d'énergie électrique relatives aux installations électriques et aux installations technologiques des entreprises envisagées.

Ainsi, nous nous sommes proposés d'étudier l'aspect technologique du problème des pertes d'énergie électrique, vu son actualité, non seulement à travers le monde mais aussi bien dans l'industrie des mines et des ciments Algérienne. Tout en proposant des directives de consommation d'énergie électrique rationnelle de point de vue de l'économie.

En faisant une analogie aux appareils technologiques de fragmentation dimensionnel où l'application de la fragmentation est évidente et surtout en considérant l'aspect économique de l'énergie électrique des installations de broyage et de concassage de la cimenterie de Ain-Touta. En plus nous avons élargi le champs de recherche sur l'économie d'énergie électrique Aux transformateurs d'électricité de la cimenterie de El-Ma-Labioud

Dans notre pays, le sujet est réel et d'une actualité incontestable. C'est dans ce contexte que nous nous sommes proposés d'étudier ce problème et d'approfondir les recherches en minimisant les pertes d'énergie électrique, tout en assurant l'économie et la qualité du produit désiré en particulier dans les installations électriques de transformation cas de la cimenterie de El-Ma-Labioud et de production cas du broyage et du concassage de la matière première de la cimenterie de Ain-touta, où existe les conditions favorables pour l'application.

En vertu d'une analyse bien détaillée sur le régime de fonctionnement des transformateurs d'électricité de la cimenterie de El-Ma-Labioud et sur le régime de fonctionnement des installations de broyage et de concassage de la cimenterie de Ain-Touta ou le problème des pertes d'énergie électrique était posé. Pour ces entreprises, ces installations représentent à l'état actuel un gisement potentiel de l'économie d'énergie électrique, les équations fonctionnelles que nous avons établi pour la première fois dans les conditions réelles relatives aux différentes installations des entreprises envisagées, représentent les modèles mathématiques de l'optimisation de la consommation d'énergie électrique. Son objectif global est de réduire l'énergie supplémentaire non productive afin d'améliorer les recettes et le niveau d'encaissement et de mettre en place des dispositifs pour pérenniser les résultats et maîtriser l'outil de gestion. Cette façon de faire permet d'instaurer une culture de lutte contre les pertes qui en général manque dans les entreprises où seuls les services d'inspection sont



chargés de traiter toutes les affaires à caractère irrégulier . Précisons également que nous nous intéresserons aux pertes en projet portant sur le choix des investissements et les pertes d'exploitation portant sur le régime de fonctionnement et le choix entre la réparation et le remplacement des installations. C'est l'objectif principal visé dans cette thèse.

## Problème posé

Les pertes électriques sont inévitables, proviennent généralement de la production et du transit sur le réseau : ce qui sont proviennent de la production sont liées aux moyens de production et aux auxiliaires ; l'amélioration de l'efficacité et de l'exploitation des outils de production permet de réduire ces pertes. Tandis que Les pertes de transport et distribution proviennent du transit sur le réseau. Elles sont liées à un mauvais rendement du réseau suite au déséquilibre des charges, aux pertes actives et réactives, au mauvais facteur de puissance etc., Elles représentent 5 % à 10 % distribution et 3 % transport des pertes totales.

Elles ne sont pas les mêmes tant les problèmes rencontrés à chaque niveau sont de nature différente. les origines de ces pertes ne sont pas toujours évidentes et elles ne peuvent être mesurées précisément. Aussi, les moyens de les combattre et de les réduire sont à imaginer pour chaque cas.

C'est ce constat et les difficultés liées à la mobilisation des investissements nécessaires qui fondent les actions engagées pour optimiser les pertes. Les méthodes et techniques mises au point à cette fin tiennent en compte, du problème de développement, d'exploitation et de gestion du réseau qu'il pose comme un problème typique de recherche opérationnelle dont la fonction-objectif de base, visant à minimiser les dépenses et la défaillance du système fait apparaître la nécessité de réduire les pertes pour atteindre l'optimum économique.

Ainsi, des économies de pertes sont recherchées tant au niveau du processus de planification dimensionnement et choix des investissements par exemple que de l'exploitation du système : dispatching économique, contrôle des installations, et de sa gestion : organisation, contrôle des facturations et suivi des recettes, etc..

Pour juger de l'intérêt d'une politique d'investissement dans l'entreprise, les critères sont multiples de façon à pouvoir comparer l'utilité des recettes et dépenses intervenant à des dates différentes. La gestion efficace de l'énergie entraîne une réduction potentielle importante des coûts d'exploitation pour les entreprises.

Donc, en concluant que le problème des pertes d'énergie électrique n'est jamais résolu avec certitude malgré des recherches et des applications avancées dans ce domaine. Le problème des pertes d'énergie reste un problème posé devant les chercheurs et d'une actualité confirmée dans le présent.

# CHAPITRE 1.

## 1. Analyse des possibilités de l'économie de l'énergie électrique à l'époque actuelle :

### 1.1. Classification des pertes d'énergie électrique

Il est connu du principe théorique de l'électrotechnique, que le procédé de transfert de l'énergie électrique s'accompagne des pertes. Lors de se transfert une partie de la quantité d'énergie à transporter est dissipée dans les conducteurs par effet joule. C'est juste d'ici qu'apparaît le sens physique de la notion des "pertes d'énergie électrique".

Les pertes d'énergie ont lieu dans tout les éléments du système électrique à savoir :

- Génératrices ;
- Transformateurs ;
- Lignes électriques ;
- Consommateurs d'énergie (moteurs électriques, installations thermiques,...etc.).

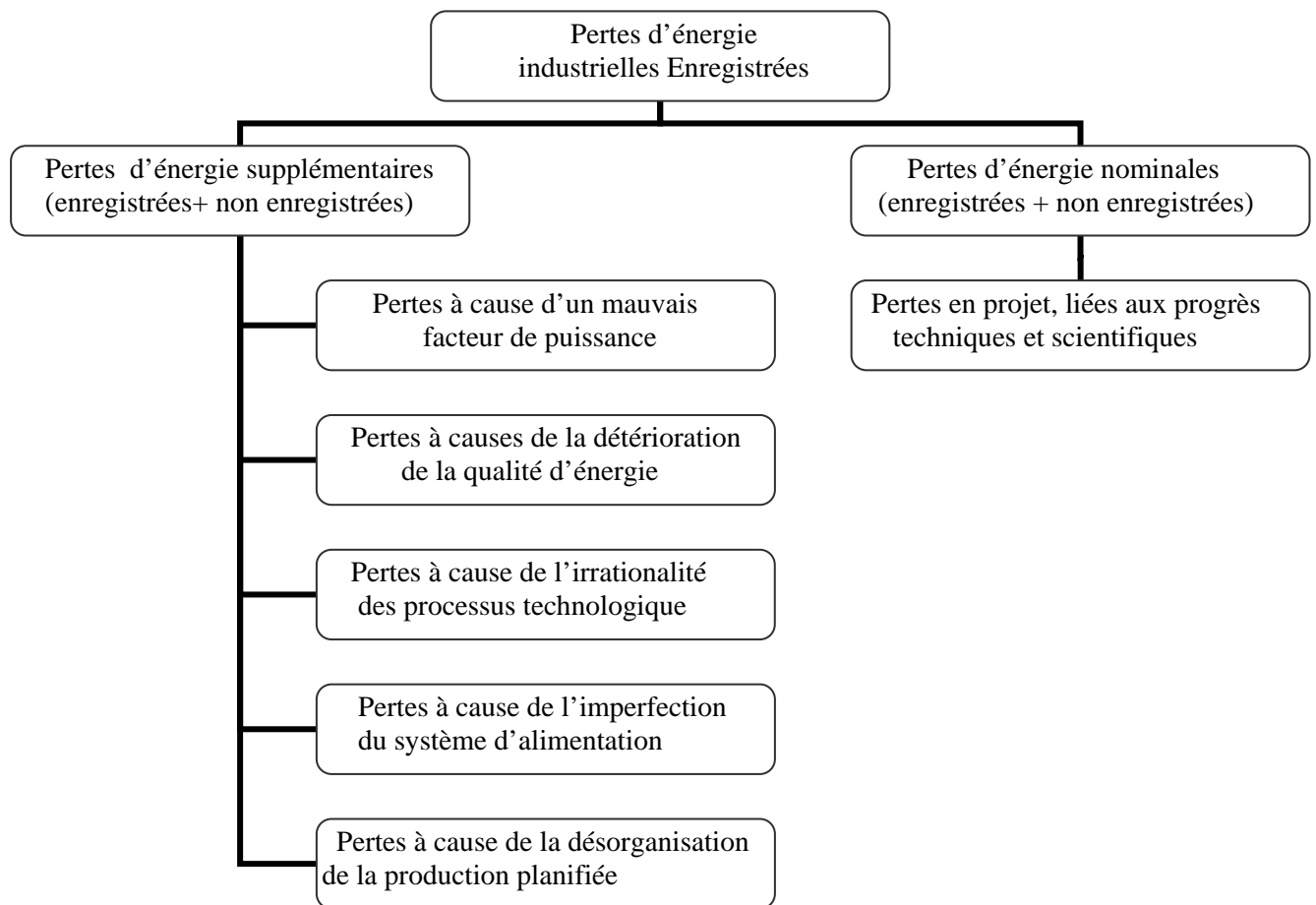
Selon la recherche bibliographique [3-5] et pour l'ensemble du système électrique, de la production à la distribution, le seuil des pertes globales (pertes nominales augmentées des pertes supplémentaires) considéré comme acceptable par les experts internationaux est de 15 à 16 %. Ce pourcentage inclut les pertes techniques et les pertes non techniques.

Pour faire face aux très nombreuses causes des pertes d'énergie électriques d'une entreprise industrielle, même si les phénomènes sous-jacents ne sont pas parfaitement compris, nous avons préféré le mode de classement des pertes adopté dans notre recherche selon les critères employés dont l'origine et l'enregistrement.

#### 1.1.1. Classification des pertes d'énergie électrique selon l'origine :

La classification des pertes d'énergie selon l'origine voir tableau 1.1, montre, que les pertes totales est une composante sommaire des pertes nominales et des pertes supplémentaires. La première composante engendre l'ensemble des pertes en projet, ces pertes sont inévitables, dans lesquelles les installation électriques fonctionnent au voisinage du régime optimal. Tandis que la seconde composante est considérable, se manifeste et accroisse dès qu'il apparaît un dérèglement dans le système. Alors, l'ajustement des paramètres de réglage pour amener le procédé de plus en plus proche des contraintes de procédé, ne peut se faire sans connaître le critérium d'optimisation. Soit disant pour notre cas de recherche nous avons pris comme critère d'optimisation la consommation spécifique d'énergie électrique. Ceci signifie de contrôler le procédé de telle façon que l'énergie consommée soit la plus proche possible de la consommation désirée.

Tableau 1.1. Classification des pertes d'énergie électrique selon l'origine



## 1.1.2. Classification des pertes d'énergie électrique selon l'enregistrement

### 1.1.2.1. Les pertes techniques

Les pertes techniques proviennent généralement de la production et du transit sur le réseau :

- Les pertes techniques de la production sont liées aux moyens de production et aux auxiliaires ; l'amélioration de l'efficacité et de l'exploitation des outils de production permet de réduire ces pertes.
- Les pertes techniques de transport et distribution proviennent du transit sur le réseau. Elles sont liées à un mauvais rendement du réseau suite au déséquilibre des charges, aux pertes actives et réactives, au mauvais facteur de puissance etc.

Ces pertes sont évaluées en faisant la différence entre les injections et les soutirages entre les différents niveaux. Elles représentent 5 % à 10 % maxi (distribution) et 3 % (transport) des pertes totales. Des méthodes de prévision grâce à des simulations (*load flow*) permettent d'en assurer la maîtrise. Il est toutefois important de noter que les outils d'analyse et d'aide à la décision pour le transport et distribution ne sont pas les mêmes tant les problèmes rencontrés à chaque niveau sont de nature différente.

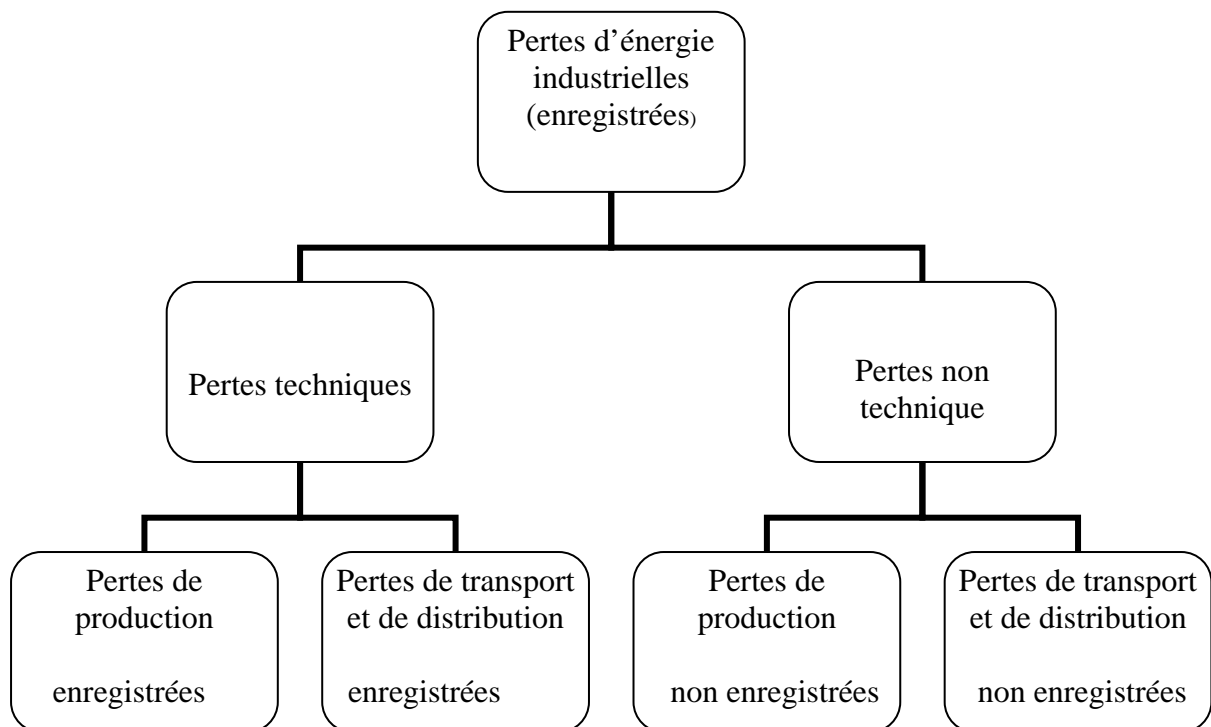
### 1.1.2.2. Les pertes non techniques

L'énergie consommée non enregistrée constitue la composante principale des pertes non techniques. S'il paraît aisé d'en estimer le niveau global par déduction des pertes globales ou de la différence entre l'énergie injectée au réseau de distribution et l'énergie effectivement facturée, les origines de ces pertes ne sont pas toujours évidentes et elles ne peuvent être mesurées précisément, il est estimé que dans certains pays en développement.

les pertes de nature non technique peuvent atteindre 50 % de la quantité totale d'électricité injectée dans le réseau ! Des facteurs endogènes (mauvaise maîtrise de la facturation, agents malhonnêtes, etc.) et exogènes (utilisation frauduleuse de l'énergie, etc.) aux sociétés de distribution sont considérés.

Aussi, les moyens de les combattre et de les réduire sont à imaginer. Des mesures et des contrôles sur le terrain participent de ces moyens. Ce sont des opérations relativement difficiles et complexes qui nécessitent de l'organisation et de la méthode.

Tableau 1.2. Classification des pertes selon l'enregistrement



### 1.1.3. Pertes industrielles

Il est établi, selon les experts de la Banque mondiale [4], qu'il est trois fois moins coûteux d'économiser 1 kWh d'électricité en améliorant le rendement du réseau de distribution que d'investir dans un nouveau moyen de production de ce kWh.

Cette approche permet de prendre en compte, dans sa globalité, le problème de développement, d'exploitation et de gestion du réseau qu'il pose comme un problème typique de recherche opérationnelle dont la fonction-objectif de base, visant à minimiser les dépenses et la défaillance du système, fait apparaître la nécessité de réduire les pertes globales (pertes techniques et non techniques) pour atteindre l'optimum économique [5].

Ainsi, des économies de pertes sont recherchées tant au niveau du processus de planification (dimensionnement et choix des investissements par exemple) que de l'exploitation du système (dispatching économique, contrôle des installations, etc.) et de sa gestion (organisation, contrôle des facturations et suivi des recettes, etc.).

Les paramètres qui influent sur les pertes d'énergie électrique industrielle par tonne de minerai extrait ( $W_s$ ) sont ainsi :

$W_c$  : Représente la consommation mensuel d'énergie, KWh/mois ;

$W_p$  : représente la consommation planifiée, KWh/mois ;

$Q_p$  : Représente la production planifiée, t /mois

On écrit sous forme mathématique l'équation fonctionnelle des paramètres cités ci-dessus :

$$F(W_s, W_c, W_p, Q_p) = 0, \quad (1.1)$$

Etant donnée que l'expression mathématique de la variation des pertes industrielles par tonne de minerai extrait ( $W_s$ ) en fonction de l'énergie consommée ( $W_c$ ), de l'énergie planifiée ( $W_p$ ) et de la production ( $Q_p$ ) peut à présent s'écrire :

$$W_s = \frac{W_c - W_p}{Q_p} = \frac{W_c}{Q_p} - \frac{W_p}{Q_p}, \text{KWh/t} \quad (1.2)$$

En analysant l'expression (1.2), la valeur du rapport  $(\frac{Wp}{Qp})$  correspond bien à la consommation normative rapportée à l'unité de production, tant le rapport  $(\frac{Wc}{Qp})$  correspond à la consommation réelle rapportée à l'unité de production et la différence de ces deux rapport représente le potentiel économique rapporté à l'unité de production

Etant donnée que la consommation ( $Wc$ ) est fonction de la consommation utile ( $Wu$ ) augmentée des pertes nominales ( $Wn$ ) et des pertes supplémentaires ( $Wsup$ ).

$$Wc = Wu + Wn + Wsup, KWh \quad (1.3)$$

En remplaçant l'équation (1.3) dans l'expression (1.2), l'équation des pertes spécifiques prend la forme suivante :

$$Ws = \frac{Wu + Wn + Wsup - Wp}{Qp}, KWh/t \quad (1.4)$$

Donc, la minimisation des pertes spécifiques ( $Ws$ ) peut se faire, non seulement en minimisant la consommation utile ( $Wu$ ), mais aussi en minimisant les pertes nominales ( $Wn$ ) et les pertes supplémentaires ( $Wsup$ ). Tout en appliquant des mesures de l'économie en particulier sur l'accroissement de courant de charge, l'impédance du réseau et à la non réalisation de la production planifiée, que ce soit par les méthodes d'investigation sur le nouveaux modes opératoires où bien par l'application de ceux déjà connus, par les méthodes que nous avons bien expérimentées.

Cependant, se sont les experts qui peuvent recommander aux technologues de réaliser des mesures de l'économie de façon meilleurs. Ces mesures peuvent se faire en améliorant les résultats par une meilleure efficacité de production et une consommation d'énergie plus faible, tout en maintenant une qualité du produit désirée. Alors, le recours aux mesures de l'économie qui ramènent le procédé dans des conditions normales et de plus en plus proche des contraintes de procédé par des opérations de réglages où bien par des petites modifications, sont donc, ainsi, une orientation indispensable et leur domaine se révèle quasiment illimité.

## **1.2. Organisation de la consommation de l'énergie électrique dans l'industrie minière algérienne**

### **1.2.1. Introduction**

L'activité minière en Algérie est très ancienne et les potentialités minières diversifiées (plus d'une trentaine de substances); aux gisements anciens de fer, phosphates, plomb, Zinc, sel, baryte, marbre, matériaux de construction,... sont venus s'ajouter des gisements d'or, wolfram, étain à exploiter et/ou à explorer dans le futur, et des indices prometteurs pour le diamant, terres rares, métaux rares et pierres précieuses et semi-précieuses [38-39].

Elle était orientée principalement vers l'exploitation des gisements de fer de phosphates et de plomb - zinc. Un effort important de recherche durant ces 30 dernières années a permis de développer l'infrastructure géologique et minière de base et d'inventorier un grand nombre de gîtes et indices dont certains offrent de réelles perspectives d'investissement pour leur exploitation et que l'Etat algérien a décidé de promouvoir et de mettre en valeur. La relance de ce secteur permet à l'Algérie d'aujourd'hui d'être un pays ouvert pour des perspectives de développement certaines.

La réforme engagée ces dernières années a permis de relancer les activités minières ; ainsi :

- Le chiffre d'affaire réalisé par les entreprises minières en 2006 a enregistré une croissance de plus de 50% par rapport à celui de l'année écoulée.
- L'indice synthétique de la croissance de la production du secteur minier Algérien a enregistré en 2006 une hausse de plus de 22 % par rapport à l'année 2005.
- La valeur ajoutée du secteur minier, de l'année 2006 par rapport à 2005, a enregistré un taux de croissance de près de 18 %.

### **1.2.2. Coûts énergétiques de l'exploitation du secteur minier**

Les coûts énergétiques représentent une partie importante du total des coûts d'exploitation du secteur minier. Directement et indirectement, la consommation d'énergie du secteur minier contribue de façon importante aux pertes d'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre. Il existe donc des motifs impérieux d'ordre économique et environnemental pour que les entreprises Algériennes d'extraction et de broyage de minerai procèdent à un examen approfondi de leur consommation d'énergie.

Conscient de ce problème, les unités de recherches minières liées aux entreprises de production du fer et des phosphates, des métaux non ferreux ainsi que les unités de ciments et ses dérivées ont inscrit le facteur des pertes d'énergie électrique comme axe de recherche prioritaire dans le plan de développement de l'exploitation et de la recherche des mines en Algérie [8-10].



Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes proposés d'étudier l'efficacité énergétique des installations électriques et de productions de différentes entreprises de l'industrie des mines et de ciments en vue de promouvoir l'utilisation plus efficace de l'énergie en Algérie.

Parmi les méthodes de recherche sur l'économie de l'énergie électrique et qui peuvent être appliquées dans l'industrie des mines et des ciments, nous avons préféré les méthodes comparatives et ceux – ci pour les raisons suivantes :

- 1- Ces méthodes donnent des résultats sûrs, rapides et convaincants ;
- 2- Application directes à l'échelle industrielle en phase d'élaboration des projets, de rénovation ou d'extension des entreprises

Ces méthodes de recherche sur l'économie d'énergie électrique sont principalement centrées sur une comparaison détaillée de la consommation d'énergie électrique réelle à des normes de consommations établies pour ce but dans des conditions appropriées en utilisant des outils mathématiques et des méthodes de recherches récentes, théoriques et expérimentales[30-37].

Notre étude comprenait de la recherche et de l'analyse comparative détaillée entres entreprises et entres activités portant sur l'énergie consommée pour l'extraction et la concentration du minerai.

Nous avons examiné plusieurs catégories de données sur les méthodes d'exploitation, la production, les sources d'énergie, la tarification d'électricité et la consommation d'énergie par tonne de minerai extrait de différentes mines et carrières de l'Algérie et du monde, dont les catégories décrit dans cette thèse sont ainsi :

### **1.3. Analyse des méthodes contemporaines de la réduction des pertes et de l'optimisation de la consommation de l'énergie électrique dans le secteur minier**

#### **1.3.1. Analyse comparative de la consommation d'énergie électrique des mines souterraines**

##### **1.3.1.1. Analyse comparative de la tarification d'énergie**

La comparaison de la consommation énergétiques des mines est d'un grand intérêt pour toutes les mines qui participent à cette analyse. Le critère essentiel pour comparer parmi les mines souterraines de différents pays concurrents est le coût énergétique par tonne de minerai extrait, qui peut être déterminer en utilisant la relation suivante :

$$C_{EU} = C_{UN} P_{UN}, DA/t, \quad (1.5)$$

Où :

$C_{EU}$  : Le coût énergétique par tonne de minerai extrait, DA/t ;

$C_{UN}$  : La consommation énergétique par tonne de minerai extrait , KWh/t ;

$P_{UN}$  : Le coût unitaire de l'énergie consommée, DA/KWh

Le coût énergétique total par tonne de minerai extrait en fonction des types de sources d'énergie utilisée, peut être déterminé en généralisant la relation (1.5)

$$\sum_{I=1}^J (C_{EU})_I = \sum_{i=1}^j (C_{UN} P_{UN})_I, DA/t, \quad (1.6)$$

Étant donné les écarts observés , entre les sources d'énergie, entre la tarification d'électricité, entre les consommations d'énergie des activités souterraines et de surfaces des mines de différents pays, nous avons réparti les comparaisons énergétiques selon ces catégories, qui sont présentées respectivement dans les figures 1.1,1.2,1.3 et 1. 4. ci-contre :

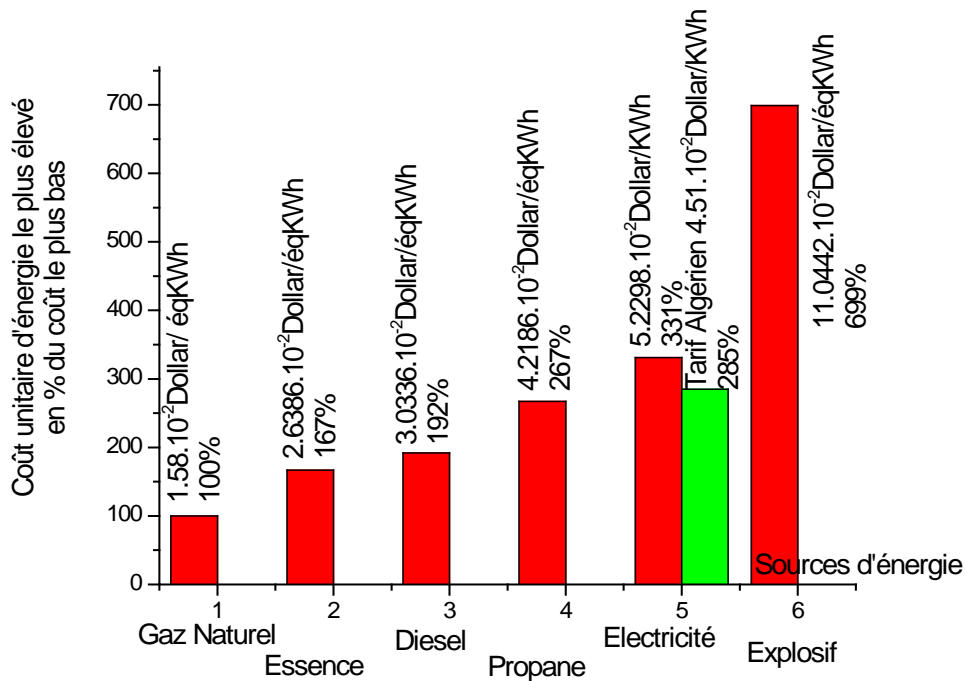


Figure 1.1. Écart des coûts énergétiques unitaires comparatifs entres sources d'énergie des pays Algérie et Canada

La variation des coûts unitaires pour chaque source d'énergie est très vaste (de 158 à 699 %), comme le montre la figure 1.1. ci dessus. Dans cette classification, l'énergie électrique est estimée par un coût unitaire moyen très élevé. Elle est classée la deuxième après les explosifs. Donc, d'ici découle que la maîtrise de la consommation de l'énergie électrique contribue plus

des économies comparatives à d'autres sources d'énergie utilisées dans le coût total par tonne de minerai traité.

En référant à la figure 1.1. le coût unitaire moyen de l'énergie électrique utilisée dans les mines Algériennes est moins important de 13.8 % par rapport au coût unitaire moyen appliqué dans les mines Canadiennes. Cette différence représente pour les mines Algériennes un potentiel d'économie réalisé par unité de l'énergie électrique consommée.

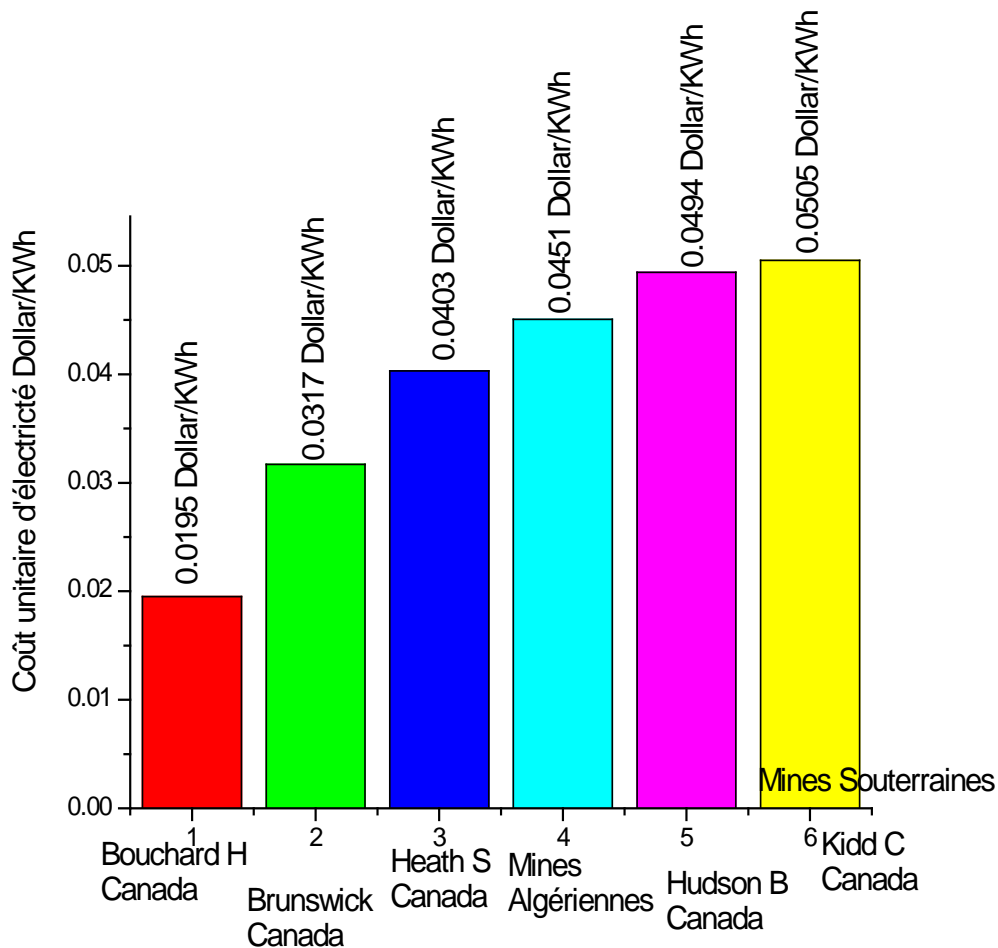


Figure 1.2. Diversités des tarifs unitaires d'électricité Comparatifs entres mines de différents pays

Les diversités des tarifs d'électricité appliquées dans les différentes mines de différents pays, sont aussi comparées à la figure 1.2.

En comparant les tarifs unitaires, le tarif moyen d'électricité appliqué dans les mines Algériennes est classé le quatrième par rapport au tarif de la mine repère parmi les mines de Canada, il est plus élevé de 131.3 %. Par rapport à la mine de Bouchard.

En partant de cette constatation, la révision du tarif appliquée en Algérie peut contribuer à la réduction du coût unitaire de l'énergie et par la suite entraîne des économies financières appréciables par tonne traitée.

### 1.3.1.2. Analyse comparative des activités souterraines

L'objectif de l'analyse consiste à comparer en détail les installations en ce qui a trait à la consommation d'énergie unitaire

Les activités des mines souterraines ont été réparties principalement en sept stades de production et en cinq activités de soutien. Voici les catégories figure 1.3. ci-dessous :

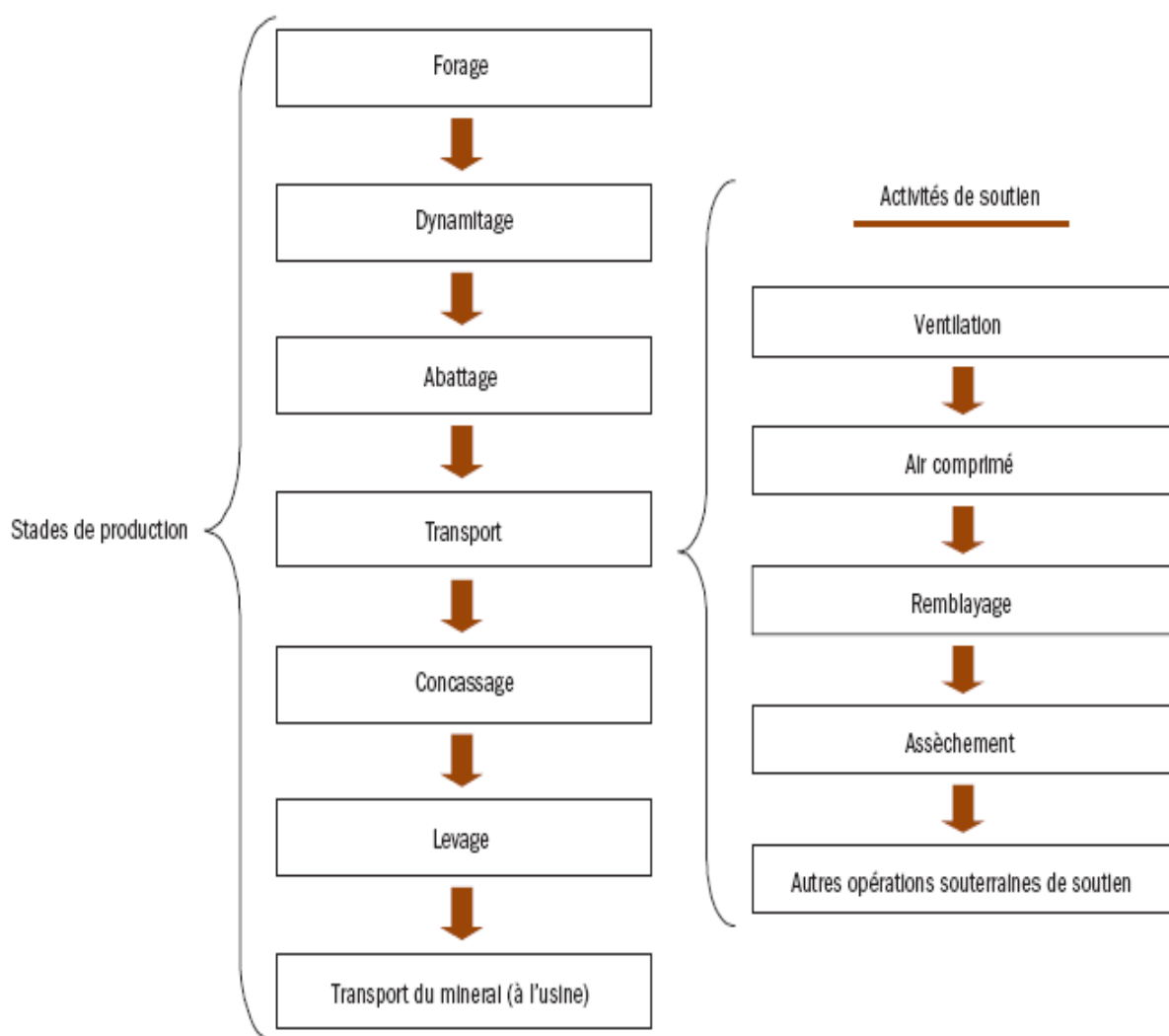


Figure 1.3. Activités souterraines

### 1.3.1.3. Analyse comparative des activités en surface

Les établissements de concentration des métaux ont été répartis selon les stades de production et les installations de soutien voir figure 1.4. ci contre

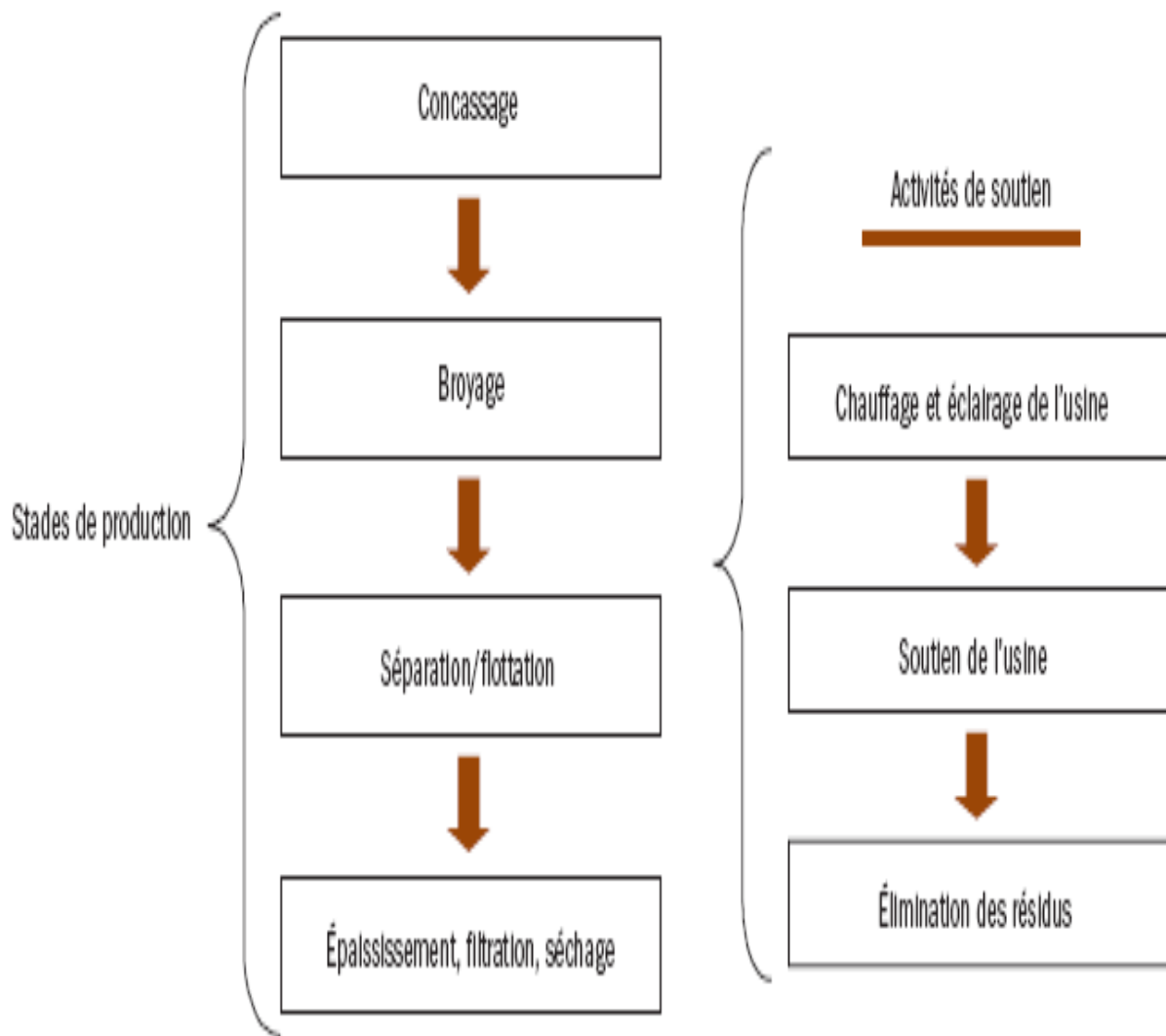


Figure 1.4. Activités en surface

### 1.3.1.4 Analyse comparative des activités du complexe

En ce qui a trait au total du complexe, les coûts énergétiques unitaires et la consommation d'énergie correspondront au cumul des données ci-dessus. Vu que certaines installations en surface traitent le minerai provenant de plus d'une mine, les données pour le total du complexe sont basées sur :

- les coûts et la consommation moyens d'énergie utilisée dans les activités d'extraction de la mine étudié;
- les coûts et la consommation moyens d'énergie utilisée dans les activités en surface.

### 1.3.2. Analyse comparative de la consommation d'énergie électrique des mines à ciel ouvert

Dans cette catégorie, l'analyse est principalement axée sur la comparaison de la consommation d'énergie découlant des activités d'extraction et de concentration des carrières et mines à ciel ouvert. dont plusieurs catégories de coûts énergétiques et de données sur la consommation de l'énergie ont été examinées à savoir :

#### 1.3.2.1. Analyse comparative des activités d'exploitation à ciel ouvert

Les activités d'exploitation à ciel ouvert ont été réparties principalement en étapes de production et en activités de soutien. Ces catégories sont présentées ci-dessous figure 1.5.

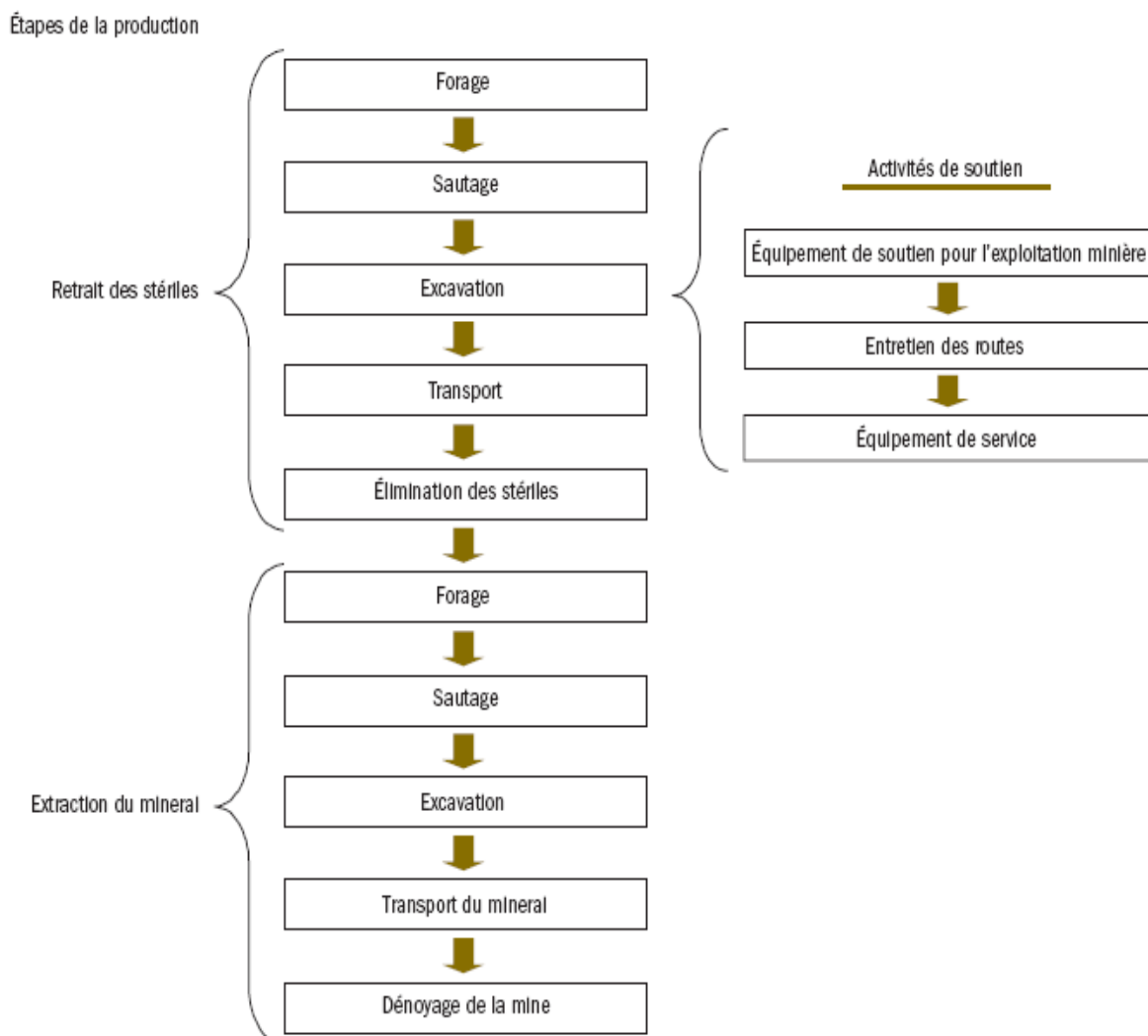


Figure 1.5. Activités de l'exploitation à ciel ouvert

Plusieurs entreprises Algérienne d'extraction et de broyage, oeuvrant plus particulièrement dans le domaine de l'exploitation des Phosphates, du Fer et des matériaux de construction. Parmi ces entreprises, nous avons pris les unités ou la comparaison sur la consommation d'énergie est possible et dont les données comparables existent à ce sujet.

En raison de la nature fort différente des activités d'extraction, de broyage et de concentration pour les phosphates, les minerais de fer et les matériaux de construction, les comparaisons de la consommation d'énergie pour ces entreprises ont été dans la mesure du possible rassemblées pour les activités de concassage, tant les activités de broyage pour les matériaux de construction et entres activités pour les phosphates.

Parmi les entreprises minières prises dans cette recherche quatre, exploitaient les matériaux de construction (cimenteries de Ain-Touta, El-Ma -Labiöd, Hamma-Bouziane et Ain-El-Kebira), une, les phosphates (Mine de Djebel-El-Onk) et quatre le minerai de fer (Mines de Boukhadra et de L'Ouenza) dont deux parmi les mines de Canada (Mines Wabush et Scully ) [8-12] ; pour les mines de fer, seules les données sur la consommation d'énergie liée aux activités d'extraction ont été recueillies (concassage). Les coefficients de recouvrement (stériles : tonnage de minerai) variaient considérablement, allant de 0,04 à 6,05 et égales à 0.25 pour les phosphates de la mine de Djebel-El-Onk. Cette variation a une incidence importante sur les coûts et la consommation d'énergie par tonne de minerai extrait

Les figures 1.6 et 1.7 ci-dessous représentent les consommations de l'énergie par 1000 tonnes de minerai concassé et de minerai broyé des entreprises minières cités ci-dessus , tant la figure 1.8 représente les consommations d'énergie des activités de la mine de phosphate de Djebel-El-Onk ou toutes les données nécessaires à la recherche sont disponibles.

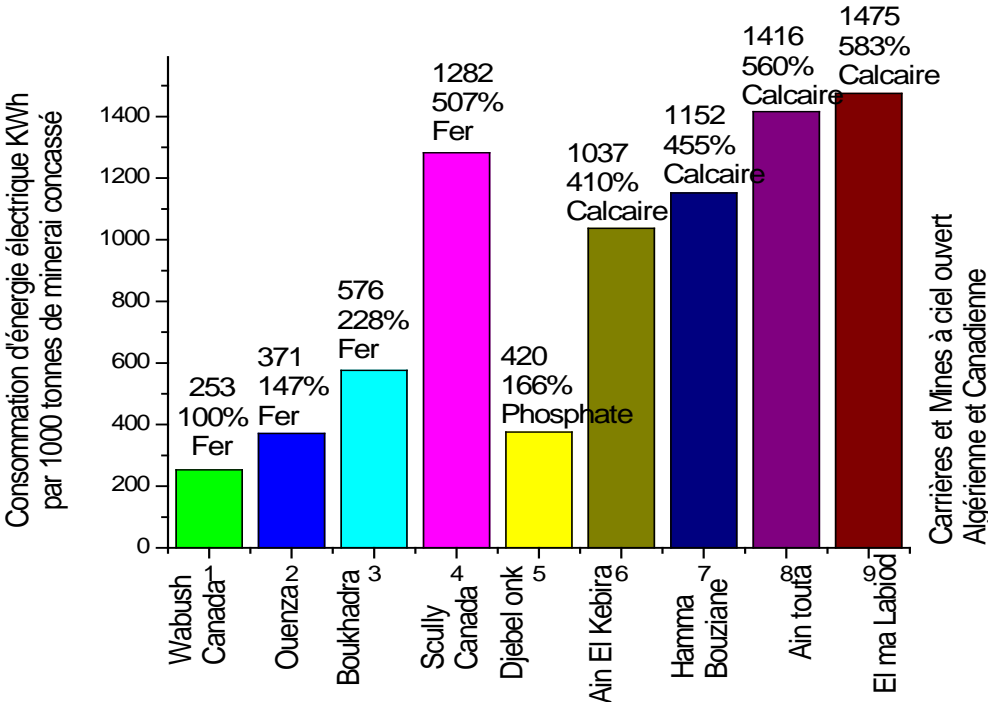


Figure 1.6. Comparaison de la consommation de l'énergie électrique des activités de concassage entres différentes entreprises des mines et de ciment de différents pays Algérie et Canada.

Les consommations énergétiques moyennes par 1000 tonnes de minerai concassé des quatre cimenteries sont les plus élevées de 410 % à 583 % par rapport à la mine repère de fer de Wabush., les plus élevées des trois échantillons du point de vue consommation d'énergie électrique. Suivait la mine de fer de Scully de 507 %. Le groupe des mines de fer et des phosphates Algériens se sont révélées les producteurs dont les consommations étaient les plus faibles après la mine de fer repère.

Ses mines ont atteint un surplus de consommation de 47 %, 66 % et 128 % respectivement pour la mine de fer de L'Ouenza , la mine de phosphate de Djebel-El-Onk et la mine de fer de Boukhadra par 1000 tonnes de minerai concassé.

Ce surplus de consommation représentent pour ces mines qui participent à cette recherche un gisement potentiel économique à réaliser.

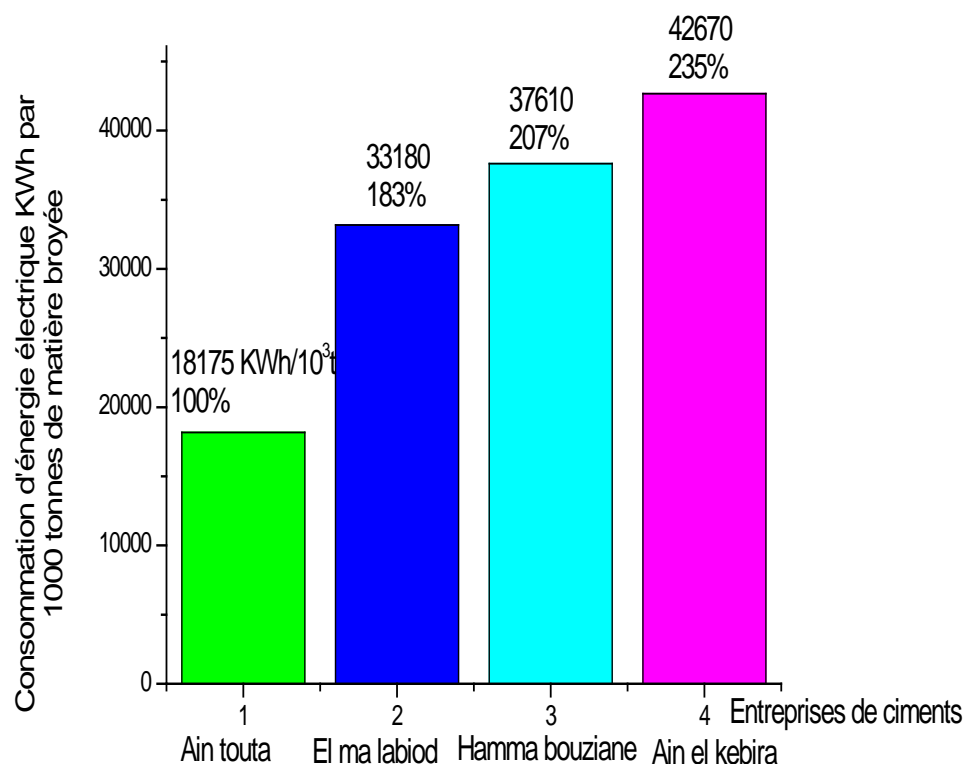


Figure 1.7. Comparaison de la consommation de l'énergie électrique des activités de broyage entre différentes entreprises de ciment de l'Est Algérien.

Par comparaison, les consommations énergétiques relatives à la cimenterie de Ain-El-Kebira sont de l'ordre de 235 %, les plus élevées par rapport à la cimenterie repère de Ain-Touta. Suivaient la cimenterie de Hamma-Bouziane de 207 % et la cimenterie de El-Ma-Labiod de 183 %. La différence entre eux représente les différents potentiels économiques.



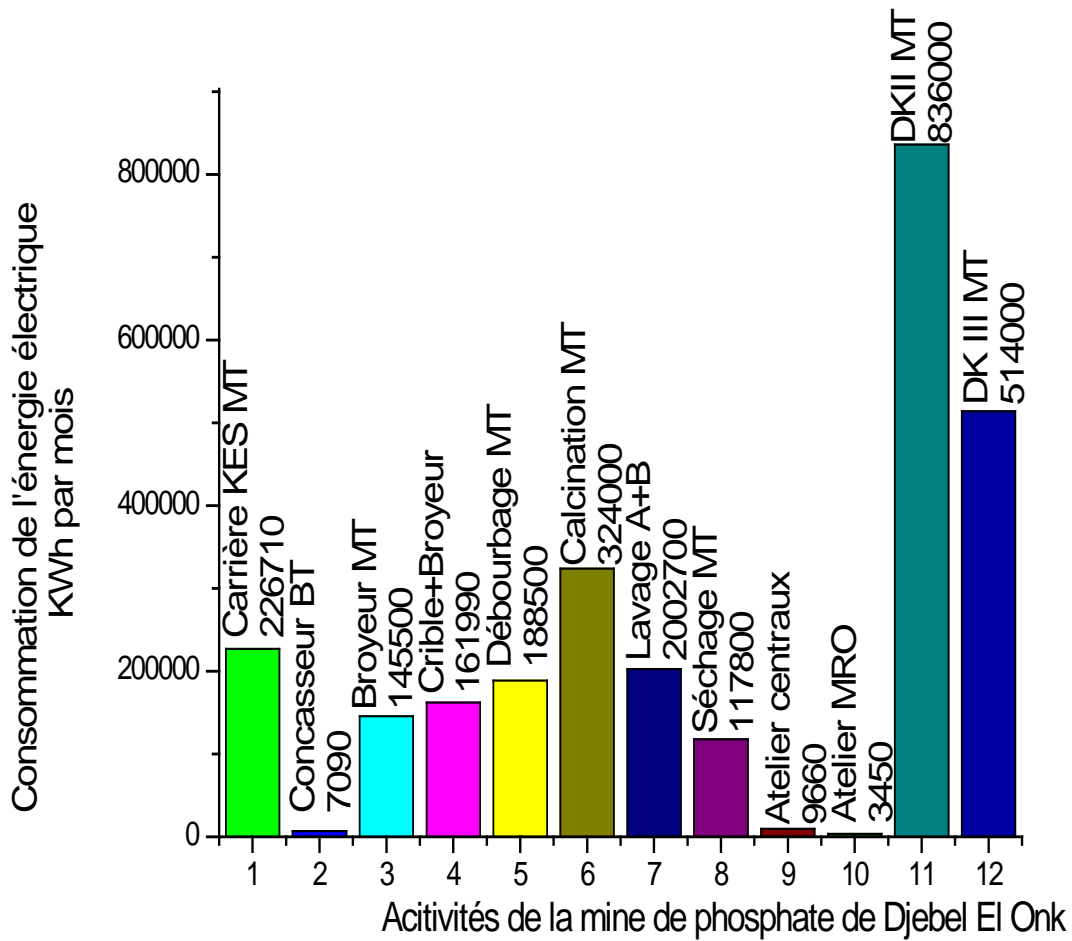


Figure 1.8. Comparaison de la consommation de l'énergie électrique entre les différentes activités de la mine de phosphate de Djebel El Onk

Le premier groupe des activités les plus consommatrices d'énergie de la mine de Djebel-El-Onk se sont les activités de traitement du minerai DKI, DKIII, la calcination et la carrière KES MT. Suivaient par le groupe des activités plus au moins importantes que précédemment se sont les activités de lavage A+B, débourage MT, crible+broyeur MT, Broyeur MT et séchage MT. Le troisième groupe se sont les activités les plus faibles du point de vue consommation représentés par les consommations des ateliers centraux, concasseur BT et les ateliers MRO.

En se référant à la figure 1.8, la consommation totale de la mine de Djebel-El-Onk en énergie électrique est de l'ordre de  $W_c = 2737400 \text{ KWh/mois}$  et la production de ce même mois est de l'ordre de  $Q_p = 112467 \text{ tonnes/mois}$ , alors la consommation rapportée à la tonne traitée est déterminée par le rapport suivant qui représente l'indice énergétique de l'entreprise :

$$C_s = \frac{W_c}{Q_p} = 24.34 \text{ KWh/t} \quad (1.7)$$

### **1.3.3. Conclusion**

Dans cette partie, nous avons présenté des économies potentielles estimatives pour les mines ou les données de comparaison sont disponibles, en fonction d'une comparaison des sources, des coûts de l'énergie, des activités de concassage, des activités de broyage et entre autres activités de chacune avec ceux au coût et de consommation les plus faibles. Les comparaisons sont établies dans les cas de l'exploitation des carrières et mines à ciel ouvert entre différents pays. Par exemple l'Algérie et le Canada (tant des mines de fer, de phosphates et des matériaux de construction).

Signalons, toutefois, que la valeur des économies potentielles peut diverger de façon importante d'un même procédé de broyage appliqué dans différentes entreprises de ciment en raison de certains facteurs :

- 1) Facteurs pratiques et organisationnelles. Par exemple, les économies peuvent être liées au régime de charge du broyeur et à l'organisation du régime de fonctionnement lié aux horaires de broyage rentables tout en répondant à la demande prévue
- 2) Facteurs techniques. Ils existe des possibilités d'améliorer les installations à moindre coût et les installations les plus efficaces par la méthode de remplacement fondée par un calcul technico-économique calculée en faisant correspondre le coût de toutes les installations à celles qui affichent les coûts énergétiques moindres.

## **1.4. Voies possibles et moyens pour économiser l'énergie électrique**

Les voies possibles de l'économie d'énergie électriques du système d'alimentation des entreprises industrielles, peuvent être choisis entre plusieurs possibilités, ainsi que dans tous les niveaux à savoir :

- Au niveau de l'élaboration du projet ;
- Pendant toute la durée de la mise en pleine exploitation ;
- Durant l'étape de la reconstruction des entreprises.

Il faut être conscient du fait que non seulement les bases sont élaborées par les chercheurs en économie d'énergie électrique et en technologie mais aussi les équipements, les composants et les matériaux qui jouent un rôle capital dans l'activité technologique et industrielle du pays.

Dans le même temps d'ailleurs, les problèmes rencontrés couramment dans l'exploitation industrielle des techniques de l'économie par exemple constituent un fonds sur lequel s'appuient en permanence des programmes de recherche fondamentale.

Cependant, et malgré, que la majorité des entreprises de l'industrie des mines et des ciments Algérienne, actuellement, sont en phase d'exploitation. Alors, nous suggérons qu'il est utile de prendre les voies possibles de l'économie d'énergie électriques de l'étape d'élaboration du projet en considération durant l'étape de la reconstruction éventuelle de ces

entreprises. C'est la raison pour laquelle, en passant à l'étude des principaux axes de l'économie d'énergie, considérés durant l'étape de la construction et de la reconstruction des entreprises.

### **1.4.1.Choix des paramètres rationnels des éléments du système d'alimentation des entreprises en phase de construction ou d'extension**

L'alimentation des entreprises en énergie électrique, peut être assurée par le poste régional d'interconnexion où bien par le poste local du système énergétique, ces différents postes alimentent les différents postes de transformation de différentes entreprises qui alimentent les différents postes et les différents consommateurs de différents ateliers. Ces éléments sont reliés électriquement par des lignes aériennes et des câbles souterrains relatives à des normes de courant de charge et de tension en vigueur.

Quant aux considérations éco énergétiques dans l'industrie des mines et des ciments, le schéma principal d'alimentation des entreprises, dépend non seulement de la tension et du courant de charge, mais aussi, dépend de la catégorie des consommateurs, de la configuration des entreprises et de la vitesse d'avancement des travaux miniers dont la forme peut être : maillée, radiale ou arborescente.

Cependant, on a avantage à relier les réseaux d'alimentation des entreprises par des lignes d'interconnexion et ceci pour trois raisons :

- 1) Stabilité ;
- 2) Continuité de service ;
- 3) Economie

La motivation de la recherche appliquée à l'économie d'énergie électrique au stade d'élaboration du projet est d'optimiser les paramètres électriques et technologiques suivants :

- Choix de la tension d'alimentation ;
- Choix de l'emplacement des sous station de distribution ;
- Choix de la section économique ;
- Choix des transformateurs éco énergétiques ;
- Choix des moteurs éco énergétiques ;
- Choix de la répartition des charges ;
- Choix de la tarification d'énergie ;
- Choix des moyens de compensation des pertes actives et réactives ;
- Choix de la protection des installations et des personnes ;

La plupart des problèmes cités portent un caractère d'optimisation, dont la solution la plus efficace peut être trouver en vertu de l'analyse d'un ensemble des variantes équivalentes.

### **1.4.1.1. Choix de la tension du réseau d'alimentation et de distribution**

Le choix de la tension rationnel est un problème complexe. Car la tension adoptée prédétermine les éléments du système électrique. Parmi lesquels sont ainsi :

- Transformateurs et appareillages électriques ;
- Lignes et câbles électriques ;
- Sources de génération ;
- Installations technologiques.

L'application de la tension élevée contribue à la réduction des pertes d'énergie et permet de transporter des puissances importantes sur des longues distances. Par ailleurs, elle exige l'augmentation des isolateurs et l'implantation des poteaux surdimensionnés.

Pratiquement, dans l'industrie des mines et des ciments, la tension du réseau de distribution est limitée par trois grandeurs normalisées : 5.5, 10 et 22 KV, ainsi que l'application de la tension de 5.5 KV est a priori irrationnelle, surtout pour le cas des entreprises, où le délais de construction est assez long.

Durant cette période, les installations les plus puissantes fonctionnent avec une charge réduites donnent des pertes à vide relativement importantes. Ces pertes de puissance et d'énergie non désirées entraînent, dans tous les cas, un accroissement des dépenses superflues et aussi un accroissement du délais de recouvrement des investissement et par la suite une diminution des revenus.

Le plus souvent les tensions normalisées 5.5KV et 0.38KV sont employées pour l'alimentation des moteurs électriques. Tandis que les valeurs 0.22KV et 0.110KV sont recommandées pour l'éclairage et les instruments de mesure et de protection.

Le fort appel de courant par les moteurs de puissance jusqu'à 600 – 700 KW fabriqués selon les constructeurs pour des tensions d'alimentation normalisées égales à 0.38KV, entraînent des pertes considérables dans le réseau d'atelier comparativement aux moteurs de même puissance fabriqués pour des tensions d'alimentation égales à 0.66 KV et d'autres avantages à signaler sur la recommandation des moteurs de tension d'alimentation égale à 0.66 KV sont ainsi :

Utilisation moins des métaux non ferreux dans la construction du réseau (faible volume d'investissement et moins de pertes d'énergie). L'application de la tension 0.66KV permet d'employer des transformateurs plus puissants et ayant des paramètres techniques et économiques meilleurs jusqu'à 2500 KVA.

Le choix des tensions à l'intérieur du site dépend essentiellement :

- De l'étendu du site et de la répartition des puissances ;
- De l'existence ou non des récepteurs MT tels que moteurs, fours...

En général, l'expérience acquise montre que :

- Pour des puissances jusqu'à 10 MVA, on choisit deux niveaux de tension (MT, BT) ;
- Pour des puissances de plus de 10 MVA, le choix de trois niveaux de tension peut s'avérer plus économique (HT, MT, BT).

Par ailleurs, le choix de deux ou trois niveaux de tension résulte d'une étude d'optimisation technico-économique qui tient compte des avantages et des inconvénients de chaque variante.

Alors, en vertu de l'indice technico-économique et d'autres considérations, nous pouvons choisir la tension rationnelle de chaque étage du système d'alimentation.

Pour trouver la solution plus pratique, il est bon maintenant de savoir comment choisir rapidement la tension rationnelle sans recours aux procédés faisant appel à des calculs plus ou moins longs et compliqués, et c'est pourquoi nous avons proposé en cette thèse un nomogramme voir figure 1.9. établi pour la première fois en fonction de certain nombre de paramètres jugés utiles (ayant déjà largement fait leurs preuves), qui sont : la tension rationnelle de la ligne ( $U_L$ , KV) , la puissance à transporter ( $Pl$ , KW) , l'impédance du réseau ( $Z$ , K $\Omega$ ) et la distance de transport ( $Lt$ , KM).

On écrit sous forme mathématique l'équation fonctionnelle des paramètres cités ci-dessus :

$$F(U_L, Pl, Z, Lt) = 0, \quad (1.8)$$

Etant donnée que la puissance ( $Pl$ ) qu'une ligne peut transporter est proportionnelle au rapport ( $U_L^2 / Z$ ). Puisque cette impédance est proportionnelle à la distance à franchir, on en déduit que la tension d'utilisation ( $U_L$ ) est donnée par une expression de la forme :

$$U_L = kr\sqrt{Pl.Lt}, KV \quad (1.9)$$

Où :

$kr$  : Facteur qui dépend de la régulation permise et du type de ligne.  
Pour une régulation de 5%,

$kr = 0.1$  pour une ligne sans compensation

$kr = 0.06$  pour une ligne avec compensation

Sur la base de l'expression (1.9), le nomogramme établi est le suivant :

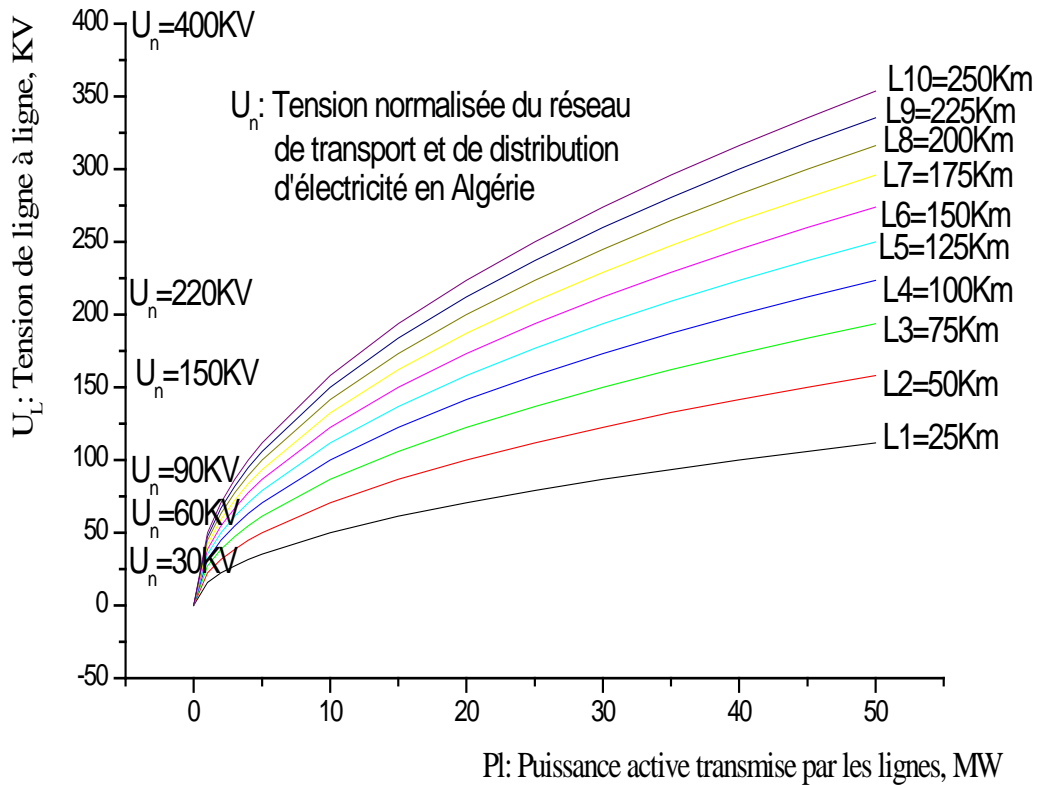


Figure 1.9. Nomogramme de la tension d'alimentation et de distribution en fonction de la puissance à transporter et de la distance de transport.

Le nomogramme de la figure 1.9 évitera tout calcul pour les tensions de transport et de distribution inférieures à 400 KV, des puissances à transporter inférieures à 50 MW et des distances de transport inférieures à 250 KM.

En générale, la tension normalisée adoptée ( $U_n$ ) est comprise entre ( $0.6 U_L$  et  $1.5 U_L$ )

Alors, l'économie de puissance électrique que nous pouvons tirer dans le cas de la conversion du réseau à la tension plus élevée, peut être déterminée, en utilisant la relation suivante :

$$\Delta W = 0.003\Gamma Lt\left(\frac{I_2^2}{q_2} - \frac{I_1^2}{q_1}\right), KW ; \quad (1.10)$$

$\Gamma$  : La résistivité du conducteur à la température  $T^\circ = 20^\circ\text{C}$ ,  $\Omega\text{m}$

$Lt$  : La distance de transport considérée, m

$I_1, I_2, q_1 \text{ et } q_2$  : Respectivement, les valeurs des courants et des sections des fils avant et après la conversion à la tension plus élevée, A,  $\text{m}^2$

### 1.4.1.2. Choix de l'emplacement des éléments du système d'alimentation des entreprises industrielles

#### 1.4.1.2.1. Structure du schéma d'alimentation

Le choix de l'emplacement des éléments électriques stationnaires de génération (compensateurs statiques, dynamiques...etc. ), des lignes de transport et des postes de transformation et de distribution demande toujours une analyse détaillée pour arriver à une solution acceptable et économique. En partant de ce principe les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures exposées ci dessous :

- 1) **structure maillée** : les postes électriques bleus sont reliés entre eux par de nombreuses lignes électriques, apportant une grande sécurité d'alimentation

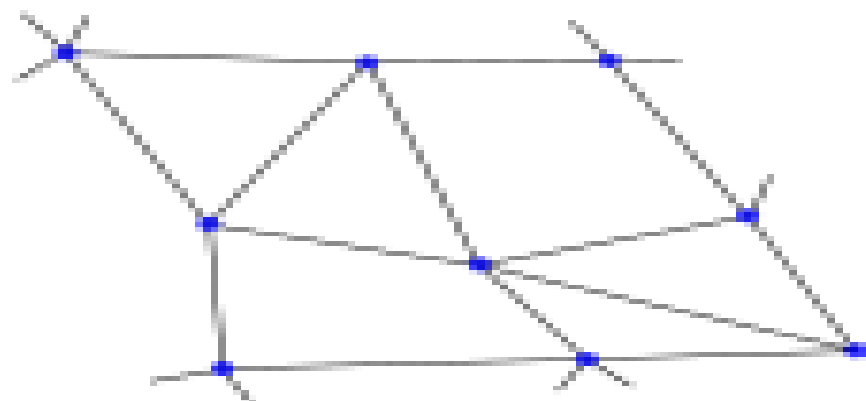


Figure 1.10. Réseau maillé

- 2) **structure radiale ou bouclée** : les postes rouges représentent les apports d'énergie : la sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée.

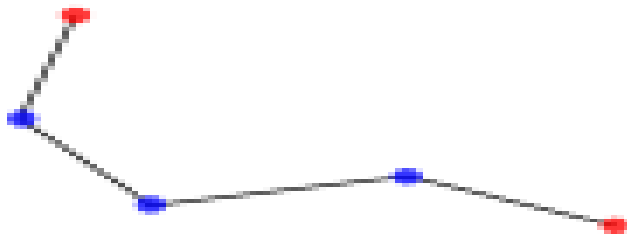


Figure 1.11. Réseau radial

- 3) **structure arborescente** : les postes rouges représentent les apports d'énergie :

la sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne ou sur le poste rouge coupe l'ensemble des clients en aval

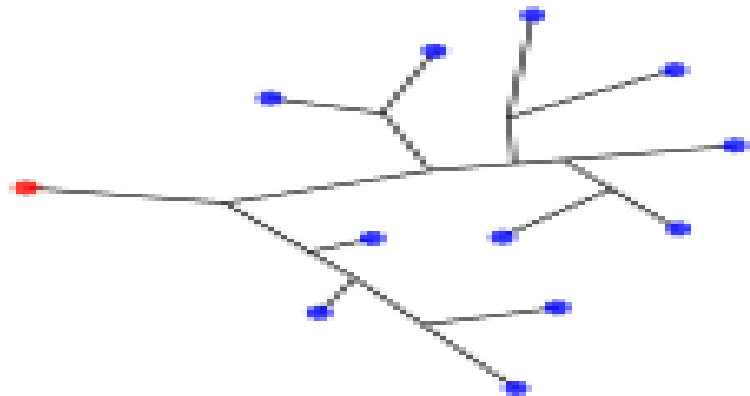


Figure 1.12. Réseau arborescent

Chaque type de structure possède des spécificités et des modes d'exploitation très différents. Les grands réseaux d'énergie utilisent tous ces types de structure. Dans les niveaux de tension les plus élevés, on utilise la structure maillée : c'est le réseau de transport. Dans les niveaux de tension inférieurs, la structure bouclée est utilisée en parallèle de la structure maillée : c'est le réseau de répartition. Enfin, pour les plus bas niveaux de tension, la structure arborescente est quasiment exclusivement utilisée : c'est le réseau de distribution.

Parfois, dans les mines on peut regrouper la sous station principale avec les sous stations secondaires et on relie directement les consommateurs au fur et à mesure de l'accroissement du volume de production c'est l'alimentation centralisée. Ce schéma est recommandé pour les



mines localisées ou les travaux progressent avec une vitesse d'exploitation lente dans les différentes direction en profondeur et en surface voir Schéma radial figure 1.11.

Quand cela n'est pas pratique ou économique, On recommande l'alimentation décentralisée c'est à dire on transporte l'énergie sous une tension supérieure à la tension d'alimentation des consommateurs et on place les sous stations secondaires à proximité des groupes des appareils de production. Ce schéma est recommandé pour les mines formées de plusieurs corps minéralisés disposés dans une seule direction de volumes inégaux ou les travaux progressent en direction et en profondeur du gisement avec une vitesse d'exploitation rapide. A cause des spécificités des mines, les lignes de transport doivent se faufiler à travers le champs minier pour relier les différentes sous station secondaires à la sous station principale Voir schéma arborescent figure 1.12 qui peut être ouvert, fermé avec alimentation unilatérale ou bilatérale.

#### **1.4.1.2.2. Choix de l'emplacement de la sous station d'énergie électrique**

Le choix de l'endroit de la disposition de la sous station principale représente un problème complexe, lié étroitement avec :

- 1) Le choix de la méthode d'exploitation dont on distingue :
  - A) Méthodes d'exploitation souterraines ;
  - B) Méthodes d'exploitation à ciel ouverts ;
  - C) Méthodes d'exploitation combinées.

Les principaux facteurs dont lesquels le choix dépend sont ainsi :

- L'emplacement des ouvrages principaux et secondaires d'ouverture des mines souterraines et des mines à ciel ouvert ;
- La disposition de l'unité de traitement du minerai en surface ;
- Le contour des réserves exploitables et non exploitables du minerai (pour des raisons économiques et sécuritaires) ;
- L'état de la surface au jour ;
- L'ordre d'épuisement des étages en direction et en pendage pour le cas de l'exploitation des mines par les méthodes souterraines :
  - Ordre chassant ;

- Ordre rabattant ;
  - Ordre combiné ;
  - Ordre de l'exploitation sur toute la longueur de l'étage
- Le sens de progression des travaux d'exploitation en direction et en profondeur pour le cas de l'exploitation des mines par les méthodes à ciel ouverts :
- Progression des travaux à ciel ouvert en direction avec un seul bord exploitable ;
  - Progression des travaux à ciel ouvert en direction avec deux bords exploitables ;
  - Progression des travaux à ciel ouvert en surface (sous forme circulaire) et en profondeur.
- Le sens de progression des travaux d'exploitation à ciel ouvert et souterraine et la combinaison des facteurs cités pour le cas de l'exploitation des mines par les méthodes combinées ;
- Les dépenses minimales d'investissement et des frais d'exploitation des installations d'électrification qui alimentent les sous stations secondaires des corps minéralisés prévus en projet pour l'exploitation, regroupés de façon égaux et forment deux pôles à droite et à gauche de la sous station principale.
- Les volumes des travaux d'extraction des corps minéralisés prévus en projet ;
- La distance moyenne entre les deux pôles des corps minéralisés ;
- Les charges électriques prévisionnelles ;
- La tension d'alimentation

## **A) Etablissement de l'équation fonctionnelle de l'emplacement de la sous station d'énergie électrique**

Dans ce cas le choix optimal de l'emplacement de la sous station principale est déterminé de telle manière que les investissements et les frais d'exploitation spécifiques à la production à droite et à gauche de la sous station envisagée soient minimum.

Alors, en utilisant la méthode analytique on peut déterminer la somme minimale des dépenses d'investissements et des frais d'exploitation  $D_g$  et  $D_d$  relative à la somme des réserves exploitables du minerai  $R_g$  et  $R_d$  se trouvant à gauche et à droite de la sous station principale G, pour différentes installations électriques alimentant les sous stations secondaires  $G_g$  et  $G_d$  plus clairement voir figure 1.13 ci-dessous.

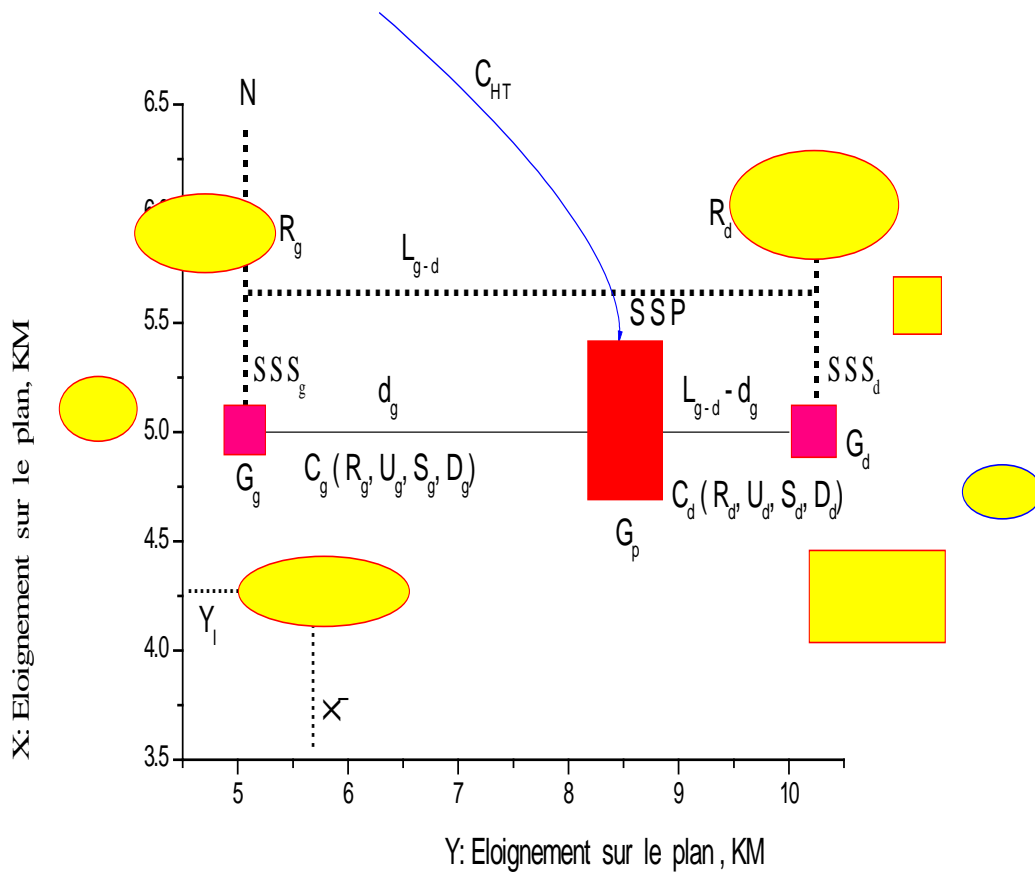


Figure 1.13.Choix de l' emplacement de la sous station principale

En tenant compte en plus des facteurs citez ci-dessus, de l'influence de la tension appliquée aux réseaux  $U_g$  et  $U_d$ , de la puissance apparente transmise  $S_g$  et  $S_d$  et de la distance moyenne qui sépare les deux sous stations secondaires  $L_{g-d}$ , nous avons pu ressortir pour la première fois une équation caractéristique qui détermine la distance optimale ( $d_g$ ) de la disposition de la sous station principale  $G(Y_p, X_p)$  par rapport à un point repère ( $G_g$ ). Pour établir cette relation, nous avons utilisé la méthode de simulation physique, basée sur la théorie de l'analyse dimensionnelle Méthode  $\Pi$  théorème voir chapitre 3.

Alors, l'équation d'équilibre des dépenses spécifiques à droite et à gauche de la sous station principale peut être composée de la manière suivante :

$$\frac{D_g}{R_g U_g S_g d_g} = \frac{D_d}{R_d U_d S_d (L_{g-d} - d_g)}, \text{ DA/[tVWm]}, \quad (1.11)$$

La distance optimale de l'emplacement de la sous station principale par rapport à la sous station secondaire se trouvant à gauche a la forme suivante :

$$d_g = \frac{L_{g-d}}{\frac{R_g U_g S_g D_d}{R_d U_d S_d D_g} + 1}, \text{ m} \quad (1.12)$$

En utilisant la méthode du problème géodésique direct et inverse, on peut déterminer les coordonnées de l'emplacement de la sous station principale avec exactitude à l'aide des équations suivantes :

$$X_p = X_g + d_g \cos \alpha_{g-d}, \text{ m} \quad (1.13)$$

$$Y_p = Y_g + d_g \sin \alpha_{g-d}, \text{ m} \quad (1.14)$$

$$Y_g = \frac{\sum_i^{n_g} Y_i R_i}{\sum_i^{n_g} R_i}, \text{ m} \quad (1.15)$$

$$X_g = \frac{\sum_i^{n_g} X_i R_i}{\sum_i^{n_g} R_i}, \text{ m} \quad (1.16)$$

$$Y_d = \frac{\sum_i^{n_d} Y_i R_i}{\sum_i^{n_d} R_i}, \text{ m} \quad (1.17)$$

$$X_d = \frac{\sum_i^{n_d} X_i R_i}{\sum_i^{n_d} R_i}, \text{ m} \quad (1.18)$$

$$L_{g-d} = \sqrt{(Y_d - Y_g)^2 + (X_d - X_g)^2}, \text{ m} \quad (1.19)$$

$$\cos \alpha_{g-d} = \frac{X_d - X_g}{L_{g-d}} \quad (1.20) \quad \sin \alpha_{g-d} = \frac{Y_d - Y_g}{L_{g-d}} \quad (1.21)$$

Où :

$\alpha_{g-d}$  : Gisement de la ligne  $L_{g-d}$  (angle formé entre le nord N et la ligne  $L_{g-d}$ )

En remplaçant les relations (1.12) et (1.20) dans l' équations (1.13) et les équations (1.12) et (1.21) dans l'équation (1.14) les coordonnées sont ainsi :

$$X_p = X_g + \frac{X_d - X_g}{\frac{R_g U_g S_g D_d}{R_d U_d S_d D_g} + 1}, \text{ m} \quad (1.22)$$

$$Y_p = Y_g + \frac{Y_d - Y_g}{\frac{R_g U_g S_g D_d}{R_d U_d S_d D_g} + 1}, m \quad (1.23)$$

## B) Analyse des résultats obtenus :

En se référant à la relation originale (1.12) relative à l'emplacement optimal des sous stations électriques, que nous avons établi pour la première fois en utilisant la méthode de recherche théorique  $\Pi$  théorème. Nous avons pu ressortir un certain nombre de conclusions :

1) Si le rapport des tensions vérifie la condition suivante  $\frac{U_d}{U_g} > 1$ , alors le choix optimale de l'emplacement de la sous station principale sera le plus proche de la sous station secondaire  $G_g$  et au contraire si  $\frac{U_d}{U_g} < 1$ , l'emplacement le plus économique de la sous station principale sera le plus proche de la sous station secondaire  $G_d$ . Ce critère d'inégalité des tension joue aussi un rôle très important lors de la décision sur le choix du mode d'alimentation des sous stations dont on distingue :

- Le mode d'alimentation collective des sous stations par des transformateurs à trois enroulements ;
- Le mode d'alimentation séparée des sous stations par des transformateurs à deux enroulements.

2) Si le rapport des tensions appliquées est égale à l'unité  $\frac{U_d}{U_g} = 1$ , alors dans ce cas là ; le choix de l'emplacement de la sous station principale est indépendant de l'égalité des tensions. Mais les modes d'alimentation des sous stations sont influencés par cette égalité dont on distingue :

- Le mode d'alimentation collective des sous stations par des transformateurs à deux enroulements ;
- Le mode d'alimentation séparée des sous stations par des transformateurs à deux enroulements

3) si les tensions appliquées sont égales  $U_g = U_d$  et les puissances électriques transmises sont aussi équilibrées  $S_g = S_d$ , alors les équations de l'emplacement optimale de la sous station principale (1.22) et (1.23) se transforme respectivement de la manière suivante :

$$X_p = X_g + \frac{X_d - X_g}{\frac{D_{sd}}{D_{sg}} + 1}, m \quad (1.24)$$

$$Y_p = Y_g + \frac{Y_d - Y_g}{\frac{D_{sd}}{D_{sg}} + 1}, m \quad (1.25)$$

La rapport (1.26) ci-dessous, représente un indice économique très important, d'un intérêt capital. Cette indice indique le pourcentage des dépenses unitaires minimales d'une tonne de minerai extrait à droite par rapport à une tonne de minerai extrait à gauche de la sous station principale, est le seul critère qui justifie le choix optimale de l'emplacement de la sous station principale.

$$\frac{D_{sd}}{D_{sg}} = \frac{D_d R_g}{D_g R_d} \quad (1.26)$$

Si l'inégalité est vérifiée

$$\frac{D_{sd}}{D_{sg}} = \frac{D_d R_g}{D_g R_d} > 1 \quad (1.27)$$

Le choix optimale de l'emplacement de la sous station principale sera le plus proche de la sous station secondaire  $G_g$

Et au contraire si

$$\frac{D_{sd}}{D_{sg}} = \frac{D_d R_g}{D_g R_d} < 1 \quad (1.28)$$

L'emplacement le plus économique de la sous station principale sera le plus proche de la sous station secondaire  $G_d$ .

Si le rapport des dépenses spécifiques est égale à l'unité

$$\frac{D_{sd}}{D_{sg}} = \frac{D_d R_g}{D_g R_d} = 1, \quad (1.29)$$

## C) Conclusion

Alors dans ce cas là ; le choix optimal de l'emplacement de la sous station principale est recommandé au milieu des sous stations secondaires  $G_g$  et  $G_d$ . Cette possibilité entraîne au maximum 50 % des dommages provenant des dépenses d'investissement et des frais d'installation du réseau surtout en cas de fermeture des mines par mesure de sécurité d'état, qui sont localisées à droite ou à gauche de la sous station principale  $G_p$ . Cette possibilité est comparée par rapport à d'autres possibilités de l'emplacement de la sous station principale dont les dommages peuvent atteindre les 100 % si l'alimentation de l'une des sous stations secondaires est centralisée tandis que la deuxième est loin de la sous station principale.

### 1.4.1.3. Minimisation des pertes des transformateurs des sous stations de distribution

Notre recherche dans cette thèse a pour objectif de fournir une base théorique afin de déterminer les meilleures options à retenir pour chaque cas pratique du choix du régime optimal de fonctionnement des transformateurs

L'étude menée montre, entre autres, qu'un critère de décision important est celui du rapport entre perte à vide et perte de charge (Pfe/Pcu) en fonction de la charge moyenne annuelle appliquée aux transformateurs. Il en ressort que pour une charge moyenne annuelle basse inférieure à 30 % il peut être avantageux de choisir un transformateur avec des pertes fer plus basses et des pertes cuivre plus élevées que la moyenne. Un choix inverse est appliqué pour un transformateur avec une charge moyenne annuelle supérieure à 40 %.

L'énergie consommée dans une région transite par des lignes à haute tension ( 90 KV, 60 KV... ) afin de minimiser les pertes par effet joule :

$$P_{\text{Pertes Joules}} = R_L I^2 = R_L \frac{S_L^2}{U_L^2}, \text{ KW} \quad (1.30)$$

Où :

$R_L$  : La résistance électrique de la ligne,  $\Omega$  ;

$I$  : Le courant de charge de la ligne, A ;

$S_L$  : La puissance électrique apparente transmise, KVA ;

$U_L$  : La tension appliquée, KV

Le niveau de tension est ensuite abaissé dans des sous stations par l'intermédiaire de transformateurs à un niveau de (10 KV, 5.5 kV). Des lignes irriguent ensuite les quartiers et les ateliers entourant la sous-station. Finalement la tension est abaissée au niveau de 0.38/0.22 KV et alimente les consommateurs de basse tension.

On voit que les transformateurs sont des appareils très importants dans le réseau de distribution. Mais ceux-ci sont une source de pertes d'énergie due au courant de magnétisation des tôles et aux pertes par effet joule dues aux enroulements.

### 1.4.1.3.1. Pertes à vide

Les pertes à vide (ou pertes fer) sont localisées dans le circuit magnétique. Ces pertes se composent principalement des pertes par hystérésis et des pertes de Foucault. La tension appliquée au transformateur variant relativement peu, on peut admettre que les pertes à vide ( $P_v$ ) sont constantes quel que soit la charge.

$$P_v = Cte, W \quad (1.31)$$

### 1.4.1.3.2. Pertes dues à la charge

Les pertes dues à la charge ( $w$ ) varient sensiblement comme le carré de la puissance débitée. Ces pertes se composent des pertes par effet joule dans les résistances ohmiques ( $RI^2$ ) et des pertes supplémentaires occasionnées par les courants parasites dans les enroulements et pièces de construction. Elles sont localisées dans le cuivre des enroulements. La valeur de ( $w$ ) dans les formules ci-dessous correspond aux pertes effectives pour la puissance nominale du transformateur ( $S_N$ ).

$$w = \frac{P_{cc} S_c^2}{S_N^2}, W \quad (1.32)$$

Où :

- $P_v$  : Pertes de puissance dans le circuit magnétique au régime à vide, W ;
- $w$  : Pertes en charge, W
- $P_{cc}$  : Pertes de puissance dans le circuit électrique au régime de court-circuit, W ;
- $S_N$  : Puissance nominale du transformateur, KVA.
- $S_c$  : Puissance apparente transmise par le transformateur, KVA

### 1.4.1.3.3. Pertes totales d'un transformateur en service

Les pertes totales de puissance d'un transformateur sont égales à la somme des pertes dues à la charge ( $W$ ) et des pertes à vides ( $P_v$ ).

$$P_t = \frac{P_{cc} S_c^2}{S_N^2} + P_v, W \quad (1.33)$$



Les pertes totales d'un transformateur sont égales à la somme des pertes dues à la charge ( $w$ ) et des pertes à vide ( $P_v$ ). Plus clairement, le graphique de la figure.1.14 ci-dessous représente bien les pertes théoriques d'un transformateur alimentant la sous station principale de la Cimenterie de Ain-Touta d'une puissance nominale  $S_N = 30$  MVA.

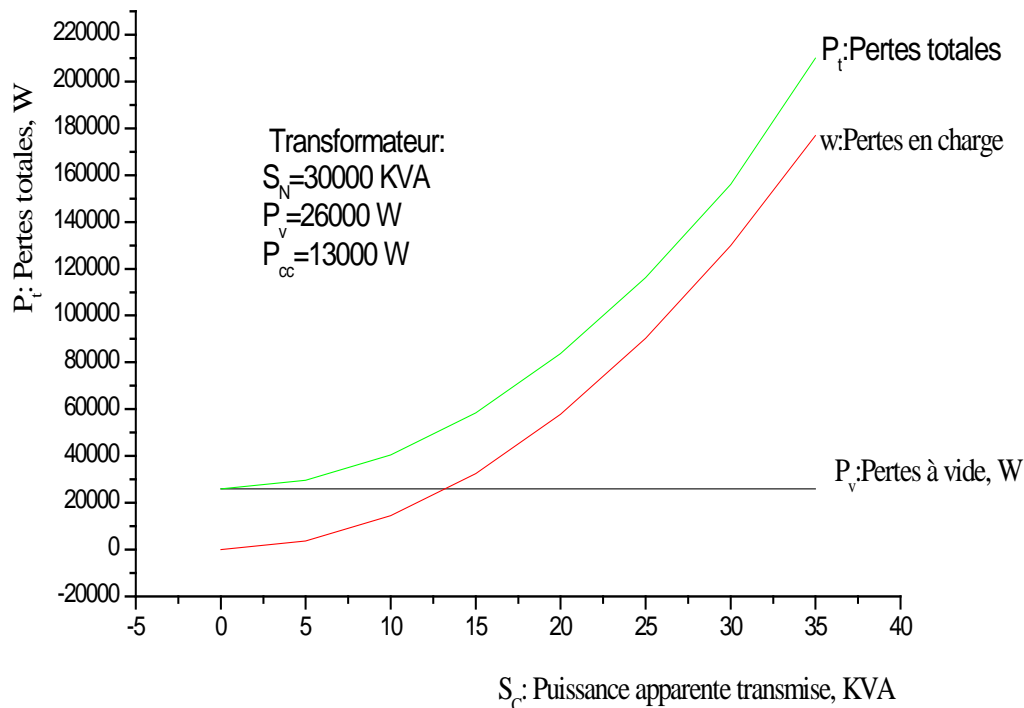


Figure. 1.14. Représentation graphique des pertes théoriques d'un transformateur principale de la sous station principale de la cimenterie de Ain-Touta de puissance de 30 MVA

### 1.4.2. Recherche des possibilités de réduire la consommation d'énergie électrique des entreprises en phase d'exploitation

Dans la plupart des installations industrielles, quatre types de possibilités s'offrent pour réduire les coûts d'électricité[15-18,25,40-41,51,58,76-81] :

1. réduire la demande de pointe, c.-à-d. la puissance maximale requise;
2. consommer l'énergie au moment où les coûts sont moins élevés.
- 3..améliorer le facteur de puissance;
4. réduire la consommation d'énergie totale (mesurée en kWh);

### 1.4.2.1. Réduire la demande de pointe

Les pointes de demande sont généralement prévisibles, nous pouvons prendre différents moyens pour les réduire :

délester la charge, c.-à-d. éteindre les pièces d'équipement non essentielles en période de pointe voir la figure 1.15. ci dessous. Cette mesure permet de changer les composants internes des machines et de faire les réparations nécessaires. Chaque arrêt est prévu longtemps à l'avance

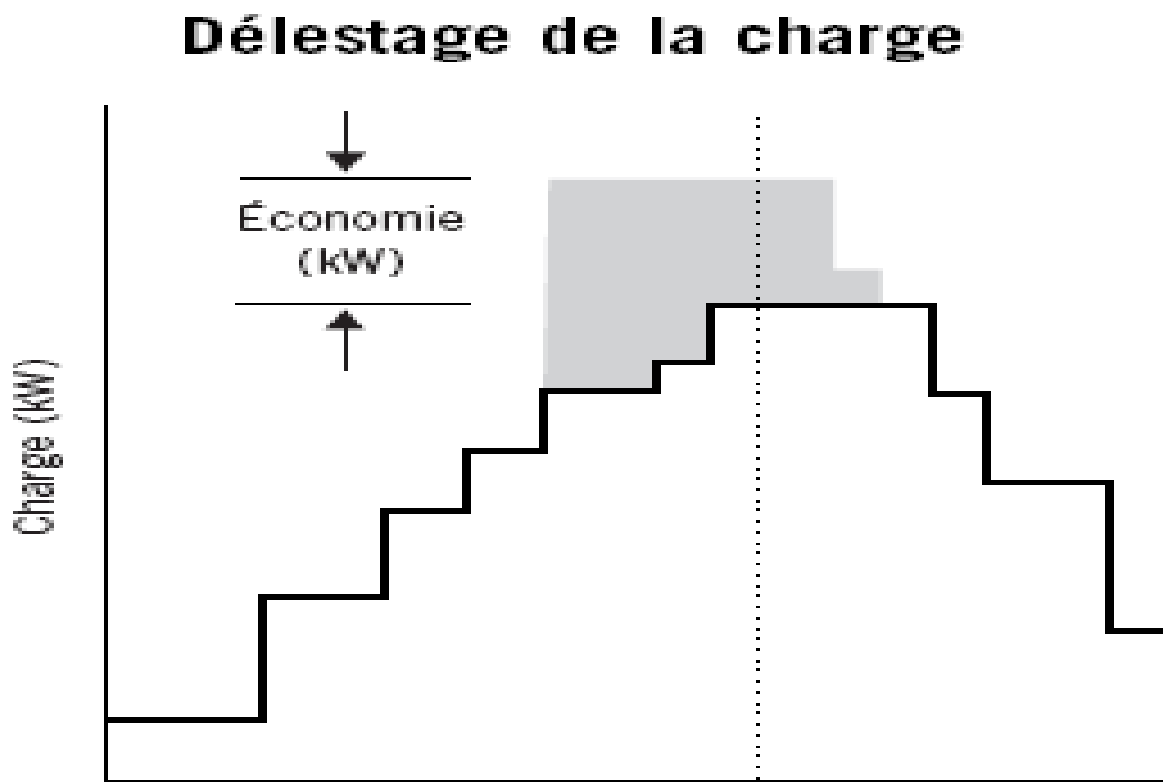


Figure 1.15. Délestage de la charge

déplacer la charge, c.-à-d. modifier l'horaire des opérations pour que certaines activités aient lieu en dehors des heures de pointe voir figure 1.16. ci- dessous Cependant, il est important que le calendrier de production soit adapté au rythme de la demande quotidienne et non seulement de la demande mensuelle. Par conséquent, un volet de la planification de la production doit inclure une ventilation des prévisions mensuelles en niveaux quotidiens estimatifs.

## Déplacement de la charge

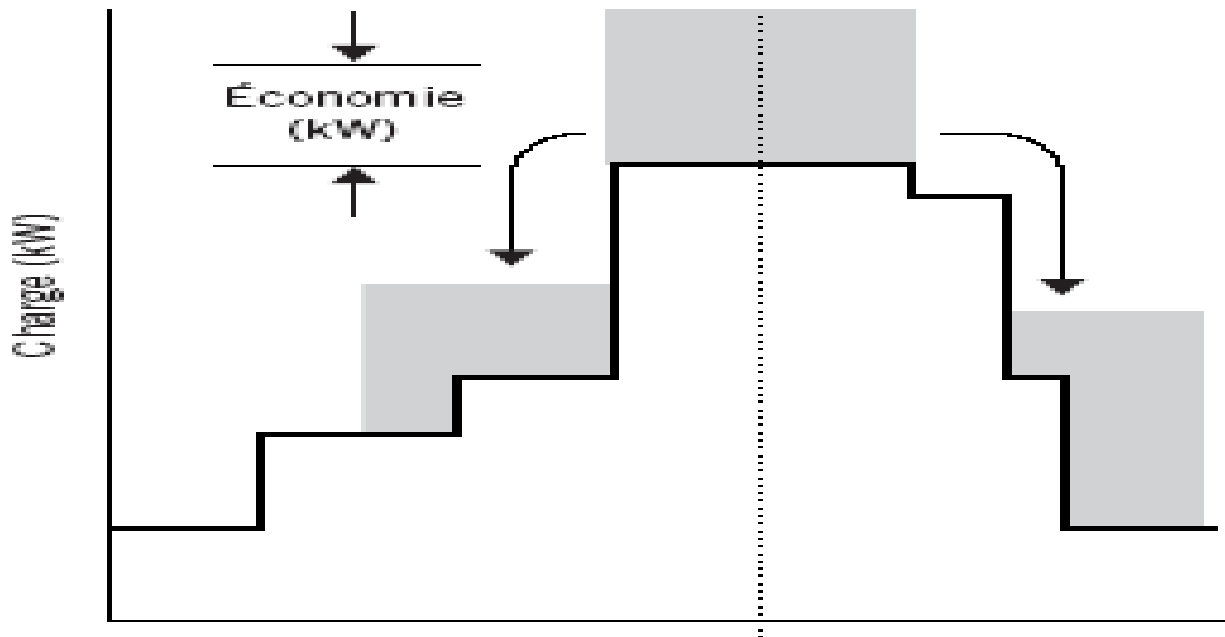


Figure 1.16. Déplacement de la charge

Si, après la mise en oeuvre de toutes les mesures destinées à réduire les pointes, la demande demeure à un niveau inacceptable, on doit envisager d'installer des groupes électrogènes pour aider à réduire la charge de pointe

### 1.4.2.2. Consommer l'énergie au moment où les coûts sont moins élevés

Allouer les heures de production aux tranches de temps les moins coûteuses disponibles, dans la mesure du possible, et à éviter les heures où la consommation est relativement chère. Cependant, nous pouvons envisager une deuxième solution : elle consiste à installer des stocks intermédiaires de pointe. Ces stocks de pointe auront la propriété, non seulement de débiter de la matière aux installations de régime continu dans les horaires de pointe, mais aussi seront utiles pour assurer la continuité de production pendant les Arrêts d'équipement prévus et imprévus

### 1.4.2.3. Améliorer le facteur de puissance

Quelques stratégies permettent de corriger le facteur de puissance trop faible :

- En faisant fonctionner les moteurs à plein charge voir figure 1.17 ci-dessous
- En assurant une tension nominale adéquate et en équilibrant les phases;
- En installant des condensateurs pour diminuer les charges de puissance réactive

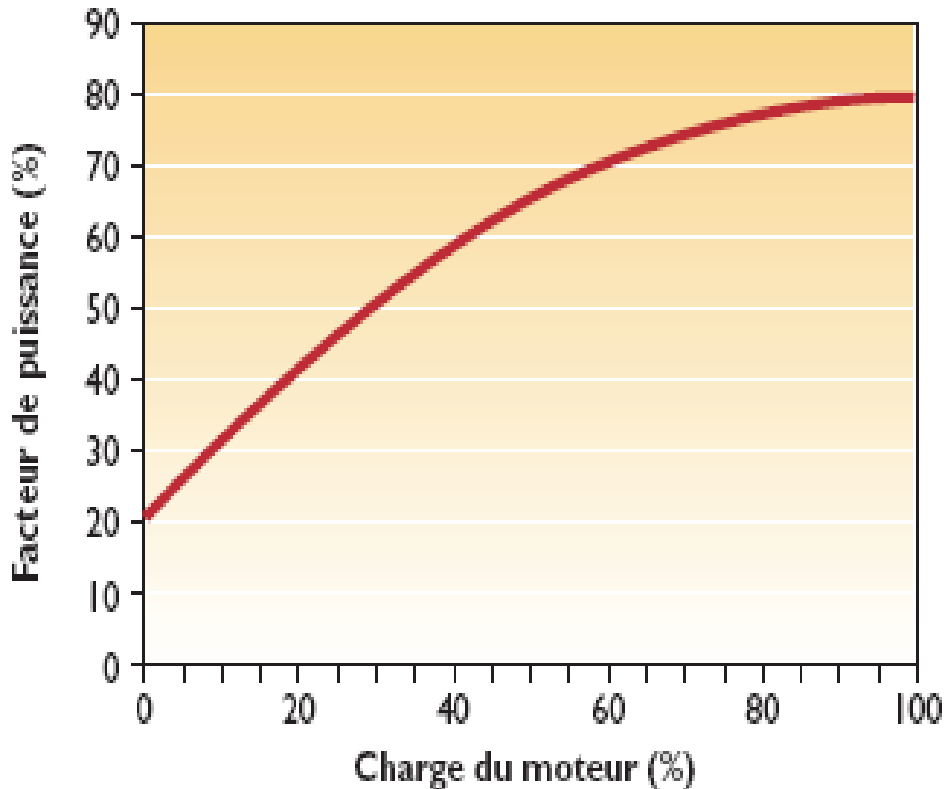


Figure 1.17. Caractéristique de la variation du facteur de puissance en fonction de la charge [79]

#### 1.4.2.4. Réduire la consommation d'énergie totale

La réduction de la consommation d'énergie électrique peut être réalisée selon deux possibilités:

- 1) En réduisant les pertes inévitables
- 2) En réduisant les pertes supplémentaires

##### 1) Réduire les pertes inévitables, trois options sont possibles:

- a) On procède au rebobinage après en avoir évalué le coût et tenu compte de l'âge du moteur, de son état général, des nouveaux moteurs disponibles et de caractéristiques mécaniques ou électriques particulières;
- b) On procède au rebobinage ou on achète un nouveau moteur standard;
- c) On achète un nouveau moteur à haut rendement

Le graphique de remplacement des moteurs figure 1.18.ci-dessous aidera les personnes concernées à décider s'il faut remplacer ou réparer un moteur défectueux.

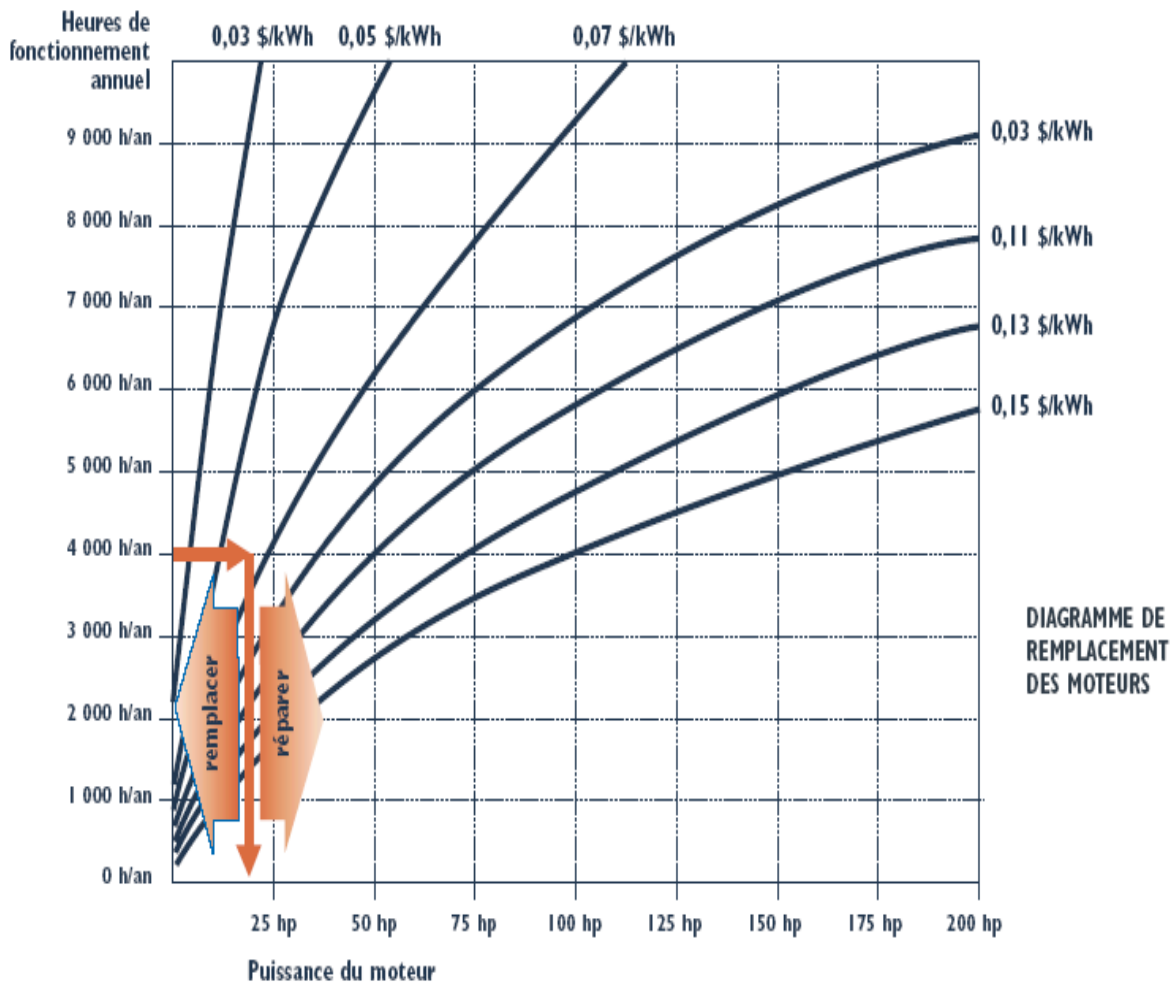


Figure 1.18. Graphique de remplacement des moteurs [15]

## 2) Réduire les pertes supplémentaires

On a le choix entre deux stratégies :

- 1) En augmentant le contrôle
- 2) En augmentant la prévention

En augmentant le procédé de contrôle de façon efficace, nous pouvons repérer l'excès de consommation, mais ce contrôle ne diminue pas le pourcentage des pertes et donc n'améliore en rien la qualité. Tandis que si on investi dans la prévention, nous pouvons obtenir une consommation minimale et un processus fiable de plus les coûts de production liés aux pertes de temps et aux défaillances seront diminués. Donc il y a amélioration de la qualité

## 1.5. Etude de l'influence du système tarifaire sur l'économie d'énergie électrique

La question abordée dans cette thèse est celle de la détermination des tarifs de façon à maximiser le bien-être des agents, tout en couvrant les coûts de production [14,40-51].

De façon assez générale, les infrastructures sont mises en place à grand frais, alors que leur coût d'opération est relativement faible. L'intérêt général commanderait qu'on tarife l'usage de ces infrastructures à leur coût marginal, en prenant soin d'y inclure tous les coûts d'opportunité, dont ceux liés à la congestion et à la pollution. A tout le moins, on devrait abaisser les tarifs de manière à assurer une pleine utilisation de ces infrastructures.

La façon de répartir les coûts peut avoir une influence sur les demandes elles-mêmes et par conséquent sur la gestion optimale du réseau de la production à l'utilisation. Donc, la fonction de demande pour les services clientèles, est nécessaire. Elle doit être établie avec certitude en tenant compte de l'état avenir.

Alors, l'objectif visé, se situe donc entre ces deux solutions.

1) On collecte suffisamment de recettes pour couvrir les coûts ou, du moins, une partie d'entre eux. Dans l'intérêt général, en maximisant l'usage de l'infrastructure.

2) On cherche la meilleure solution, étant donnée la contrainte budgétaire imposée au gestionnaire, ne peut pas être modifiée. Le problème est de déterminer les tarifs de manière à atteindre cet objectif.

Dans ce cas, il n'y a qu'un prix par unité de bien ou service, bien qu'il puisse varier d'un bien à un autre. Cette tarification est dite linéaire ou à la Ramsey-Boiteux. Ensuite, on montre qu'on peut faire mieux avec des tarifs polynômes ou non linéaires, comprenant des charges fixes, variables...etc.

### 1.5.1. La tarification à la Ramsay "tarification linéaire"

Si l'on se contente d'une tarification linéaire, définie par un seul monôme, la formule de Ramsey Boiteux indique comment faire payer les différents types de consommateurs de manière à maximiser le bien être social.

La forme du modèle du tarif monôme est de la forme suivante :

$$T = P_r W, DA \quad (1.34)$$

Où :

$P_r$  : Prix unitaire de l'énergie consommée, DA/KWh

$W$  : Energie active consommée, KWh

Selon la théorie économique et pour assurer la maximisation du bien-être des consommateurs, les biens et services doivent être vendus à leur coût marginal.

Cependant, en présence d'économie d'échelle, ce mode de tarification donne un déficit. Une solution possible consiste à combler ce déficit par une subvention. Dans d'autres situations, cela est politiquement impossible et on requiert plutôt que le responsable de la production s'autofinance, au moins en partie. Pour ce faire, il doit alors majorer les prix, du moins certains d'entre eux, au dessus des coûts marginaux.

## 1.5.2. La tarification non linéaire

Cependant, la théorie économique nous enseigne qu'il est possible de faire mieux, en offrant aux consommateurs un menu de différents tarifs polynômes, parmi lesquels chacun peut librement choisir.

Un tarif polynôme est un tarif non linéaire, défini par différents prix qui s'appliquent à différentes caractéristiques de la demande. Un tarif non linéaire peut être composé d'une charge fixe et de différents prix par unité pour différentes utilisations de l'infrastructure.

La forme du modèle du tarif polynôme peut prendre la forme suivante :

$$T(f_i, P_i, r_i, s_i) = 0 \quad (135)$$

Où :

$f_i$  : Représente une charge fixe ;

$P_i$ ,  $r_i$  et  $s_i$  : Représentent des charges variables, chacune afférente à une caractéristique différente du service.

La théorie économique récente nous montre qu'il est toujours possible de faire mieux avec un menu de tarifs polynômes qu'avec un tarif linéaire, disons. Plus exactement, il est possible d'avantager certains consommateurs, sans en défavoriser d'autres, tout en augmentant les recettes nettes.

## 1.5.3. La tarification linéaire et non linéaire en pratique

### 1.5.3.1. La tarification à la Ramsey-Boiteux

Le secteur de l'électricité fait partie des secteurs où les tarifs optimaux sont utilisés de façon extensive. Dans une étude portant sur un échantillon de fournisseurs privés d'électricité. Naughton (1988) développe un modèle de régulation par les prix où les préférences du régulateur sur les catégories de consommateurs peuvent varier. Cette analyse montre que la structure tarifaire alors en vigueur favorisait davantage les petits consommateurs, résidentiels ou commerciaux, en leur facturant, pour des raisons d'équité, des prix inférieurs aux prix de second rang de Ramsey-Boiteux. En général, les consommateurs commerciaux étaient les moins favorisés (car les moins politiquement organisés).

La règle de Ramsey-Boiteux aurait commandé d'augmenter légèrement les prix destinés à la consommation résidentielle, sans modifier les prix à la consommation industrielle, de réduire de façon significative les prix de l'électricité à usage commercial et d'augmenter les charges fixes.

Dans de nombreux pays, on a vu la tarification traditionnelle de l'électricité (tarif uniforme ou tarifs par période) évoluer vers de nouvelles formes qui tiennent compte des coûts marginaux variables de fournir le service et ce de façon dynamique.

Une particularité importante de ces nouveaux tarifs est qu'ils sont le plus souvent proposés comme options au tarif de base, de sorte que les consommateurs peuvent choisir entre l'ancien et les nouveaux tarifs. Sur sept pays européens étudiés, six offrent des tarifs par période comme alternative au tarif unique de base.

Dans une expérience de tarification dynamique réalisée en Finlande, Räsänen et al.(1997) Proposent une grille de tarifs qui aurait donné au consommateur la possibilité de choisir le tarif le mieux adapté à son type de consommation.

Il y a quatre types de tarifs envisagés :

- Un prix uniforme ;
- Un tarif avec prix par période ;
- Un menu de deux prix uniformes ;
- Un menu de deux tarifs avec prix par période.

Cette étude montre que l'option de deux tarifs avec prix par période donne les bénéfices les plus élevés. En permettant aux consommateurs de choisir entre plusieurs tarifs, on peut accroître le bien-être social.

### **1.5.3.2.Tarifs polynômes**

Les compagnies d'électricité utilisent fréquemment des tarifs binômes ou polynômes. Par exemple, la compagnie Commonwealth Edison proposait en 1976 un tarif polynôme de la forme suivante (Brown et Sibley, 1986) :

$$F = a + e.W , \quad \$/\text{Mois} \quad (1.36)$$

Dans lequel :

a : Tarif d'abonnement constant  $a = 1.20 \$$  ;

e : Prix unitaire  $\$/\text{KWh}$  suivant la consommation était inférieure ou supérieure à 100 KWh avec  $e = 0.0418 \$$  et  $0.03148 \$$ .



Dans cet exemple, l'abonnement est le même, quelle que soit la consommation. Dans d'autres cas, la charge fixe elle-même peut varier avec la consommation.

Electricité de France (EDF) propose ce genre de tarification. Les tarifs d'EDF reposent sur un système élaboré de prix non linéaires. Un exemple est le tarif bleu qui offre trois options aux consommateurs. Chaque option consiste en un abonnement mensuel et un prix par unité d'énergie consommée. L'abonnement est calculé suivant un programme non linéaire et est d'autant plus élevé que les besoins sont grands.

Les consommateurs peuvent choisir entre les trois options suivantes (Wilson,1993) :

- 1 - Tarif de base ;
- 2 - Tarif " heures creuses " ;
- 3 - Tarif "Périodes critiques" .

Par rapport au tarif de base, l'abonnement du tarif " heures creuses" est plus élevé et celui du tarif "période critique" est plus faible. Avec le tarif de base, le prix unitaire de l'électricité est constant alors que les deux autres tarifs ont chacun un deuxième prix. Avec le tarif "heures creuses", le prix est réduit pendant les périodes creuses alors que le tarif "périodes critiques" impose un prix très élevé pour l'électricité consommée en période de pointe, pénalisant la consommation en période de très forte demande où la capacité est saturée. Ce tarif bleu est en fait une combinaison de trois tarifs binômes, chacun consistant en un abonnement et une charge pour l'énergie consommée. Les trois options offrent à chaque consommateur la possibilité de choisir le tarif binôme qui minimise ses dépenses étant donné son profil de consommation.

Il existe de surcroît un tarif jaune et un tarif vert, qui sont dans l'ensemble similaire au tarif bleu, si ce n'est qu'ils font dépendre la facturation d'autres facteurs, comme la saison, le mois, la durée de la consommation, etc. Mais, en général, les petits consommateurs ont le choix entre des tarifs moins raffinés et moins complexes que les grands consommateurs (industrie, etc.). Avec la mise en œuvre de tels tarifs non linéaires, EDF couvre ses coûts et incite les consommateurs à utiliser les ressources énergétiques de façon plus efficace.

### **A)Timbre de soutirage en HTB**

Le tarif de soutirage en HTB et HTA sans différenciation temporelle dépend de la puissance souscrite  $P_{\text{souscrite}}$  en kW et du taux d'utilisation de la puissance souscrite.

La formule tarifaire proposée pour la composante annuelle de soutirage aux domaines de tension HTB et HTA, analogue à celle en vigueur depuis le 1er novembre 2002, est la suivante :

$$F = a_2 P_{\text{Souscrite}} + b \cdot \tau^C P_{\text{Souscrite}} + \sum_{12\text{mois}} \text{CMDPS} , \quad (1.37)$$

Le taux d'utilisation  $\tau$  est calculé à partir de l'énergie active soutirée pendant la période de 12 mois consécutifs considérée  $E_{soutirée}$  en kWh, de la puissance souscrite  $P_{souscrite}$  en kW et de la durée  $D$  en heures de l'année considérée selon la formule suivante :

$$\tau = \frac{E_{Soutirée}}{D \cdot P_{Souscrite}} \quad (1.38)$$

Les coefficients  $a_2$ ,  $b$  et  $c$  employés sont ceux du tableau 1.3. ci-dessous :

Tableau 1.3. Coefficients du modèle de paiement d'électricité par EDF

Domaine de tension	$a_2$ €/KW/an	b €/KW/an	$\alpha$ €/KW/an	c
HTB3	5.66	15.33	0.25	0.938
HTB2	10.40	23.22	0.60	0.708
HTB1	13.80	46.75	0.80	0.760
HTA	20.19	74.04	0.8 $a_2$	0.790

Pour les utilisateurs auxquels est appliqué un tarif sans différenciation temporelle et dont un point de connexion est équipé d'un compteur mesurant les dépassements de puissance active par rapport à la puissance souscrite par période d'intégration de 10 minutes, les composantes mensuelles de dépassement de puissance souscrite relatives à ce point sont établies chaque mois selon les modalités ci-après

$$CMDPS = \alpha \sqrt{\sum (\Delta P^2)} \quad (1.39)$$

Les dépassements de puissance par rapport à la puissance souscrite  $\Delta P$  sont calculés par période d'intégration de 10 minutes. Le facteur  $\alpha$  applicable est défini dans le tableau 1.3. ci-dessus :

## B) Tarifs de soutirage en HTA

Les utilisateurs raccordés au domaine de tension HTA ont le choix entre trois options tarifaires :

- option sans différenciation temporelle de même structure que pour le domaine de tension HTB ;
- option avec différenciation temporelle à cinq classes ;
- option avec différenciation temporelle à huit classes.

Les utilisateurs optant pour les tarifs avec différenciation temporelle se voient appliquer des prix élevés pendant les heures pleines d'hiver, mais peuvent bénéficier de tarifs plus faibles en dehors de cette période.

Le choix de l'option tarifaire et des niveaux de puissance souscrite est laissé à l'utilisateur du réseau ou à son mandataire. Les gestionnaires de réseaux publics de distribution conseillent les utilisateurs ou leurs mandataires pour leur permettre de choisir l'option la mieux adaptée à leurs besoins.

### C) Tarifs optionnels avec différenciation temporelle

Les classes temporelles sont fixées localement par le gestionnaire de réseau public en fonction des conditions d'exploitation des réseaux publics.

Pour chacun de leurs points de connexion au domaine de tension HTA pour lesquels ils ont choisi un tel tarif et pour chacune des  $n$  classes temporelles qu'il comporte, les utilisateurs choisissent, par multiples de 1 kW, une puissance souscrite  $P_i$ , où  $i$  désigne la classe temporelle. Quel que soit  $i$ , les puissances souscrites doivent être telles que  $P_{i+1} \geq P_i$ .

En chacun de ces points de connexion, la composante annuelle des soutirages est établie selon la formule suivante :

$$F = a_2 P_{\text{Souscrite Pondérée}} + \sum_{i=1}^n d_i E_i + \sum_{12\text{mois}} \text{CMDPS}, \quad (1.40)$$

Où :

- $E_i$  : Désigne l'énergie active soutirée pendant la  $i^{\text{ème}}$  classe temporelle, exprimée en kWh.
- $d_i$  : Coefficient pondérateur de l'énergie, c€/KWh
- $P_{\text{Souscrite Pondérée}}$  : Désigne la puissance souscrite pondérée, calculée selon la formule suivante :

$$P_{\text{Souscrite Pondérée}} = k_1 P_1 + \sum_{l=2}^n k_l (P_l - P_{l-1}) \quad (1.41)$$

Où :

- $k_i$  : Coefficient pondérateur de puissance de la  $i^{\text{ème}}$  classe temporelle, %

## d) Tarif soit progressif soit dégressif

Lorsque le prix payé par les consommateurs dépend de la quantité consommée, il est fréquent que ce prix soit dégressif : plus on consomme, plus le prix unitaire est faible. Dans certain cas cependant, cela peut être le contraire : par exemple, un prix progressif peut être opportun, afin d'encourager l'utilisation efficace de l'énergie.

Ainsi, la compagnie China Light and Power de Hong Kong est passée d'un tarif dégressif de la forme :

$$e = \frac{e_0}{W^m}, \text{ \$ /KWh ;} \quad (1.42)$$

Dans lequel :

$e_0$  : Prix d'équilibre , \$ /Mois ;

$W$  : Energie consommée, KWh/Mois ;

$m$  : Coefficient strictement positive

A un tarif uniforme en 1994

$$e = e_0 = \text{Cte} , \text{ \$ /KWh ;} \quad (1.43)$$

puis à un tarif progressif à trois niveaux en 1996 et enfin à un tarif progressif à quatre niveaux en 1998.

$$e = e_0 W^{m_i}, \text{ \$ /KWh} \quad (1.44)$$

Dans lequel :

$m_1, m_2, m_3, m_4$  : Coefficients strictement positives respectivement de chaque niveau de tarif proposé.

Les prix élevés pour les niveaux supérieurs de consommation découragent le gaspillage, alors que les prix faibles pour les consommations des niveaux inférieurs sont destinés à protéger les usagers à faibles revenus qui consomment peu d'énergie. Certaines métropoles, comme Tokyo ou San Francisco, appliquent aussi des tarifs progressif pour les particuliers.

## 1.5.4. Structure de la nouvelle tarification appliquée en Algérie

### 1.5.4.1. Objectif

L'électricité est un bien de consommation qui est devenu indispensable au bien-être de la population et au développement économique de toute société Algérienne.

Le nouveau système tarifaire appliqué en Algérie à pour objectif principaux [41,51] :

- La minimisation des coûts de l'énergie électrique
- D'assurer l'efficacité tant pour la collectivité que pour l'utilisateur

Pour assurer la cohérence de l'efficacité au plan national avec celle de l'utilisateur, La structure de la nouvelle tarification doit concorder avec la structure des coûts de fourniture de l'électricité. Donc, une adéquation entre les capacités de production, de transport et de distribution disponibles à moyen et long terme d'une part et l'évolution de la demande future d'électricité d'autre part est indispensable pour arriver à l'optimum des dépenses.

Les coûts de l'électricité ont été considérés à un niveau national. Ainsi la nouvelle tarification ne comporte plus de différenciation selon les régions, ce qui l'inscrit dans la politique de développement équilibré du pays.

L'analyse des coûts de fourniture a été faite par niveau de livraison de l'électricité aux abonnés ou trois séries de tarifs correspondant à ces niveaux de livraison sont proposées aux abonnés :

- Haute tension                    400, 220, 90 et 60 KV
- Moyenne tension                30, 22, 10 et 5.5 KV
- Basse tension                    0.38, 0.22 KV

### 1.5.4.2.La demande d'électricité en Algérie

#### A) Historique de la consommation

L'évolution de la consommation sur la période 1995 – 2004 a évolué avec un taux de croissance annuel moyen de 5.1% voir figure 1.19. ci-contre.[51]

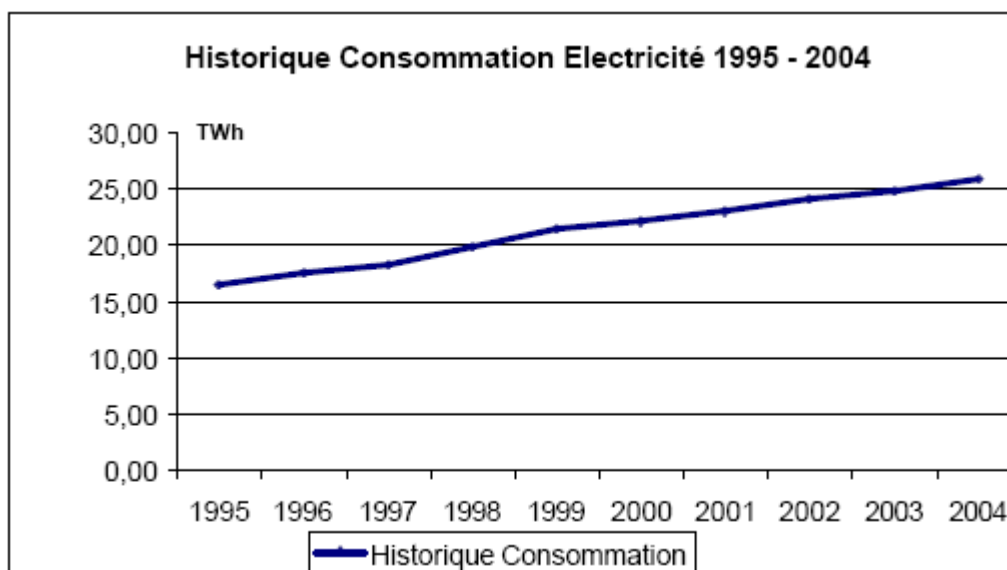


Figure.1.19. Historique de consommation électricité 1995-2004

## B) Evolution de la consommation, de la production d'énergie et de la puissance maximale appelée

Le processus de prévision de la consommation électrique à moyen terme[51], consiste à déterminer les prévisions énergétiques annuelles par niveau de tension et à les traduire en prévisions de puissance voir figure 1.20 ci-dessous. Pour ce but un programme indicatif met en évidence les besoins en moyens de production de l'électricité pour les dix prochaines années (2006-2015) figure 1.21 tant l'évolution de la puissance maximale appelée plus clairement voir figure 1.22.

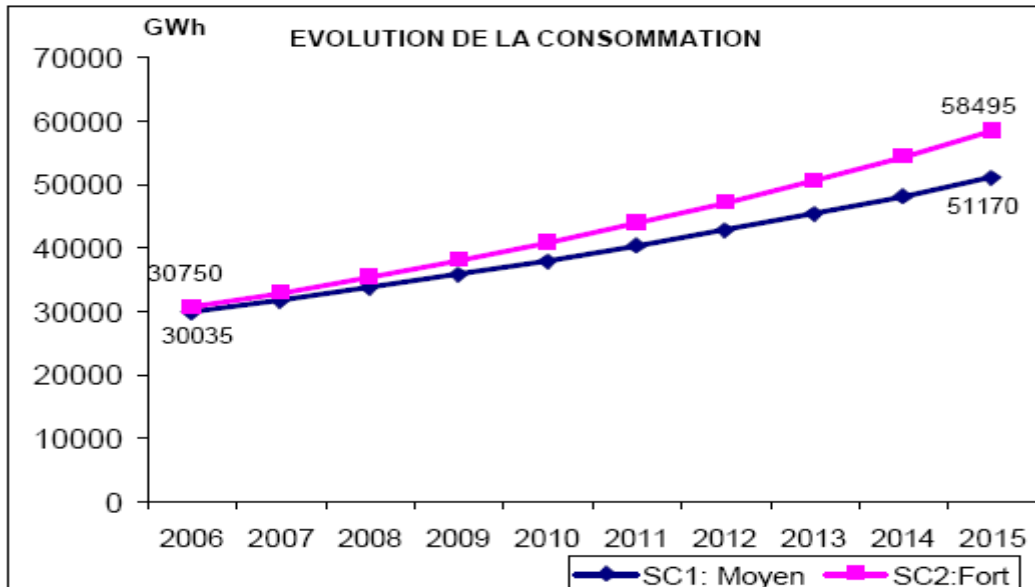


Figure.1.20. Evolution de la consommation 2006-2015

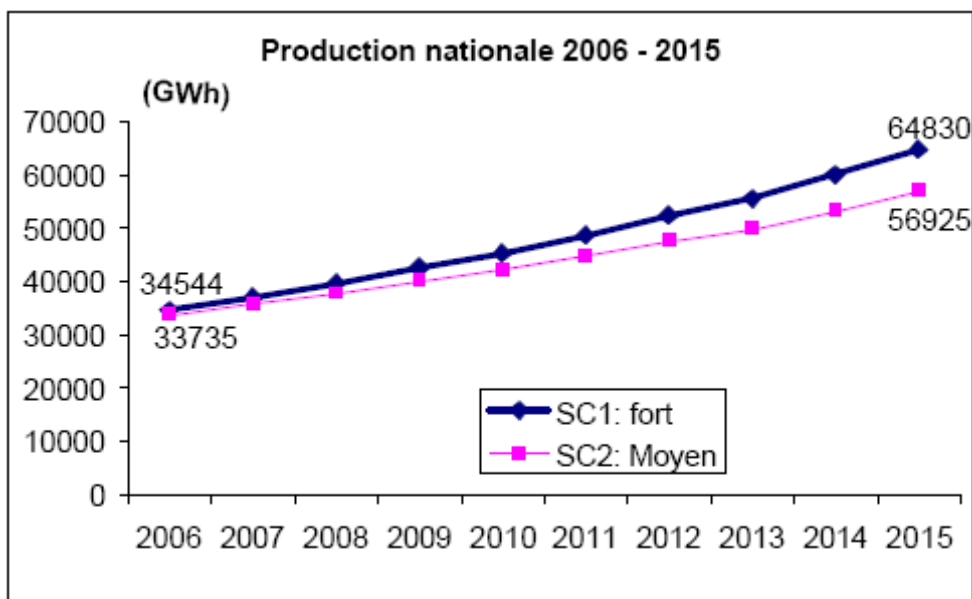


Figure1.21. Evolution de la production national 2006-2015

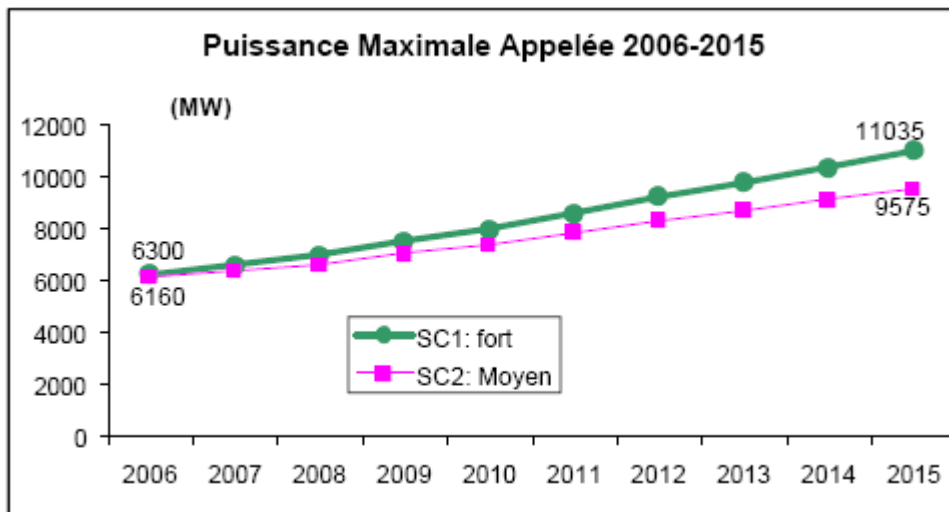


Figure 1.22. Evolution de la puissance maximale appelée 2006-2015

### C) Pertes de distribution et de transport d'électricité

L'évolution probable des pertes de distribution et de transport d'électricité est indiquée dans la figure 1.23 ci-dessous, tenant compte des plans de développement importants qui sont engagés par les structures chargées de la distribution ainsi que par le gestionnaire du réseau de transport électricité [51]. Il est escompté pour l'année 2015 des taux de pertes respectifs de 7 % et 3%.

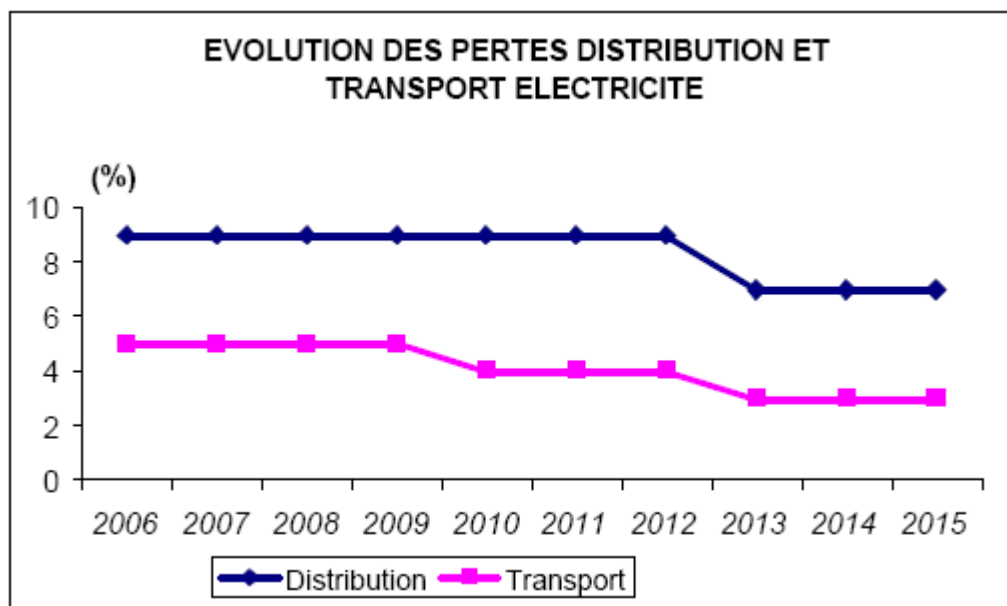


Figure 1.23. Hypothèse d'évolution des pertes distribution et transport 2006-2015

Par ailleurs, les nouvelles centrales mises en service en 2005 et en cours de construction sont données dans le tableau 1.4 ci-dessous :

Tableau 1.4. les nouveaux moyens de production en cours de construction et prévus période 2005-2008

	Société	Type	P(MW)	Date de MSI	Observations
Arzew	KAHRAMA	TG	3x112	06/2005 07/2005 09/2005	Date du 1 <sup>er</sup> couplage
Skikda II	SKS	CC	2x412.5	04/2006	
Berrouaghia	SKB	TG	2x242	09/2006 10/2006	
Hadjret Ennous	SKC	CC	3x400	07/2008	

## D) Echanges de l'énergie avec l'étranger

Le réseau national est interconnecté avec les réseaux voisins du Maroc, à l'ouest et de la Tunisie, à l'Est à travers plusieurs lignes, comme indiqué dans le tableau 1.5 ci-dessous; les lignes en technique 400 kV étant en cours de construction. Le réseau Algérien est ainsi interconnecté au réseau UCTE depuis 1998, à travers l'interconnexion Maroc – Espagne.

Tableau 1.5. Echange de l'énergie avec l'étranger

Poste 1	Poste 2	L (km)	Simple ou Double Circuit	Section (mm <sup>2</sup> )	Tension (kV)	Capacité nominale (MW)
<b>Algérie – Maroc</b>						
Gha zaouet	Oujda	47	Simple	1x411	225	225
Tlemcen	Oujda	65.8	Simple	1x411	225	225
Hassi Aneur	Bourdim	250	Double	2x570	400	2x1200
<b>Algérie - Tunisie</b>						
El Aouinet	Tajerouine	62	Simple	1x411	220	225
El Aouinet	Tajerouine	60	Simple	1x228	90	54
El Kala	Fernana	45	Simple	1x228	90	54
Djebel Onk	Metlaoui	59	Simple	1x411	150	60
El Hadjar	Jendouba	120	Simple	2x570	220/400	1200

### 1.5.4.3. Structure de la nouvelle tarification

La structure de la nouvelle tarification appliquée en Algérie, est identique à celle des coûts de fourniture de l'énergie.

Son expression est un polynôme :

$$F = a + [c_c.Pc + d.Pa] + \left[ \sum_{i=1}^3 eh_i.Eh_i + g(Q - rE) \right], \quad (1.45)$$

Dans lequel:

F: Est le montant mensuel de la facture, DA/Mois ;



1) Facturation de la redevance :

Le premier terme

$$F_1 = a \quad (1.46)$$

Dans lequel :

- $F_1$  : facture les redevances fixes relatives aux frais de gestion technique et commerciale de l'abonné, DA/Mois.

2) Facturation de la puissance :

Le 2<sup>ème</sup> terme

$$F_2 = c_c P_c + d.P_a \quad (1.47)$$

- $F_2$  : facture la puissance selon 2 grandeurs ; la puissance mise à disposition et la puissance appelée.

Dans lequel :

- $d$  : Est le prix unitaire de la puissance absorbée, DA/KW/Mois ;
- $P_a$  : Est la puissance maximum absorbée par l'abonné durant la période de facturation et qui est donnée par un appareil indicateur de puissance équipant le panneau de comptage, KW.
- $c_c$  : est le prix unitaire ,DA/KW/Mois ;
- $P_c$  : la puissance mise à disposition , KW

La puissance mise à disposition  $P_c$ , est la puissance réservée par la SONELGAZ en vertu d'un accord avec l'abonné et que ce dernier peut appeler selon ses besoins.

Cette puissance correspond aux investissements consentis par SONELGAZ pour assurer à l'abonné la possibilité d'appeler, à son gré et à tout instant, une puissance mobilisée par lui.

La puissance mise à disposition doit être toujours supérieure à la puissance absorbée. En cas de dépassement, l'abonné doit :

- Soit demander une nouvelle  $P_c$  que SONELGAZ lui accorde quand le réseau d'alimentation le permet.
- Soit prendre des mesures nécessaires pour limiter la puissance appelée à la valeur de la  $P_c$  contractuelle.

L'évaluation, tant du niveau de la puissance à contracter que la date à laquelle cette puissance doit être mise à disposition, doit se faire correctement. Dans le cas contraire, les investissements réalisés par SONELGAZ pour répondre à la demande de l'abonné seront excédentaires, insuffisants ou anticipés.

### 3) Facturation de l'énergie

Les énergie actives et réactives sont facturées selon le terme :

$$F_3 = \left[ \sum_{i=1}^3 eh_i \cdot Eh_i + g(Q - rE) \right], \quad (1.48)$$

Dans lequel :

- $eh_i$  : Est le prix unitaire de l'énergie active pour le poste horaire h, CDA/KWh et dont le prix est différencié par période de la journée :
  - heures de pointe de 17h – 21h
  - heures pleines de 6h à 17h et de 21h à 22h30
  - heures creuses de 22h30 à 6h.
- $Eh_i$  : Est l'énergie active consommée au cours du mois dans le poste horaire h , KWh/Mois;
- E : Est l'énergie active consommée au cours du mois, KWh/Mois ;

$$E = \sum_{i=1}^3 Eh_i, KWh / Mois \quad (1.49)$$

- Q : Est l'énergie réactive consommée au cours du mois, KVArh/Mois ;
- r : Est la valeur du rapport qui correspond au facteur de puissance normatif fixé par la SONELGAZ (  $\cos\varphi = 0.894$  )

$$r = \operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{Pa} = 0.5 \quad (1.50)$$

- g : Est le prix unitaire de l'énergie réactive, CDA/KVArh

### 1.5.4.4.Optimisation de la structure de tarification

#### A) Méthode analytique

En référant à l'expression (1.45) du système de tarification et par la méthode de différentiation partielle, nous avons obtenu un critère d'optimisation qui joue un rôle très important et qui peut être considéré comme un indice économique. Ce critère peut être déterminé de la manière suivante :  $(c_c, d, eh_i, g)$

- 1) En différentiant la fonction du tarif (F) par rapport aux variables  $(c_c, d, eh_i, g)$  qui représentent respectivement les prix unitaires de la puissance mise à disposition, de la puissance absorbée, de l'énergie active consommée pour les différents postes horaires et de l'énergie réactive.

$$\frac{\partial F}{\partial c} = 0 \quad (1.51) \qquad \frac{\partial F}{\partial d} = 0 \quad (1.52)$$

$$\frac{\partial F}{\partial eh_i} = 0 \quad (1.53) \qquad \frac{\partial F}{\partial g} = 0 \quad (1.54)$$

nous avons trouvé les équations suivantes :

$$\frac{\partial F}{\partial c} = Pc \quad (1.55) \qquad \frac{\partial F}{\partial d} = Pa \quad (1.56)$$

$$\frac{\partial F}{\partial eh_i} = Eh_i \quad (1.57) \qquad \frac{\partial F}{\partial g} = Q - rE \quad (1.58)$$

Or, les équations (1.55), (1.56) et (1.57) sont égales à des constantes strictement positifs, ne peuvent dans quel cas être nulles. Seul l'équation (1.58) peut être nulle

$$\frac{\partial F}{\partial g} = Q - rE = 0 \quad (1.59)$$

D'où on tire de la relation (1.59) le critère d'optimisation qui est la consommation d'énergie réactive livrée par le fournisseur gratuitement.

$$Q_{opt} = rE \quad (1.60)$$

Ce critère d'optimisation formule (1.60) suit une loi linéaire de vitesse (r), sa valeur autorisée accroît avec l'accroissement de l'énergie active consommée. Si cette condition est satisfaisante, le terme qui facture l'énergie réactive consommée sera nul

$$g(Q - rE) = 0 \quad (1.61)$$

Et par conséquent le polynôme de tarification formule (1.45) sera diminué de la facturation de l'énergie réactive consommée et de nouveau prend la forme suivante :

$$F \min = a + [c.Pc + d.Pa] + \sum_{i=1}^3 eh_i.Eh_i \quad (1.62)$$

Et on dit que la fonction du tarif (F) atteint son minimum

## B) Méthode graphique

Ces trois postes horaires donnent lieu à 3 séries et 10 périodes tarifaires voir tableau 1.6 ci-contre et plus clairement nous avons élaboré des graphiques à l'aide duquel on peut procéder facilement et rapidement au choix du tarif économique respectivement de la série haute et moyenne tension les plus utilisées dans l'industrie voir figures 1.24 et 1.25. ci-dessous

Tableau. 1.6. Barèmes des Prix Abonnés Moyenne et Haute Tension

Code Tarif	Redevance fixe DA/Mois	Puissance mise à disposition DA/KW/Mois	Puissance maximale absorbée DA/KW/Mois	Energie active CDA/KWh	Energie réactive CDA/KVArh Malus	Energie réactive CDA/KVArh Bonus
31	421177.73	31.61	157.88	Pointe 550.71 Pleine 113.85 Nuit 49.19	25.84	5.168
32	421177.73	84.12	421.15	Unique 114.32	25.84	5.168
41	32227.79	21.54	96.79	Pointe 726.68 Pleine 161.47 Nuit 85.33	37.94	7.588
42	429.71	32.25	150.48	Pointe 726.68 Hors Pointe 150.53	37.94	7.588
43	429.71	32.25	128.80	Nuit 85.33 Jour 356.92	37.94	7.588
44	429.71	32.25	150.48	Unique 313.02	37.94	7.588
51	286.44	29.85	-	Pointe 716.32 Pleine 191.07 Nuit 106.37	-	-
52	66.4	29.85	-	Pointe 716.32 Hors pointe 157.19	-	-
53	66.4	14.81	-	Nuit 106.37 Jour 429.88	-	-
54		4.37	-	Unique 417.89	-	-

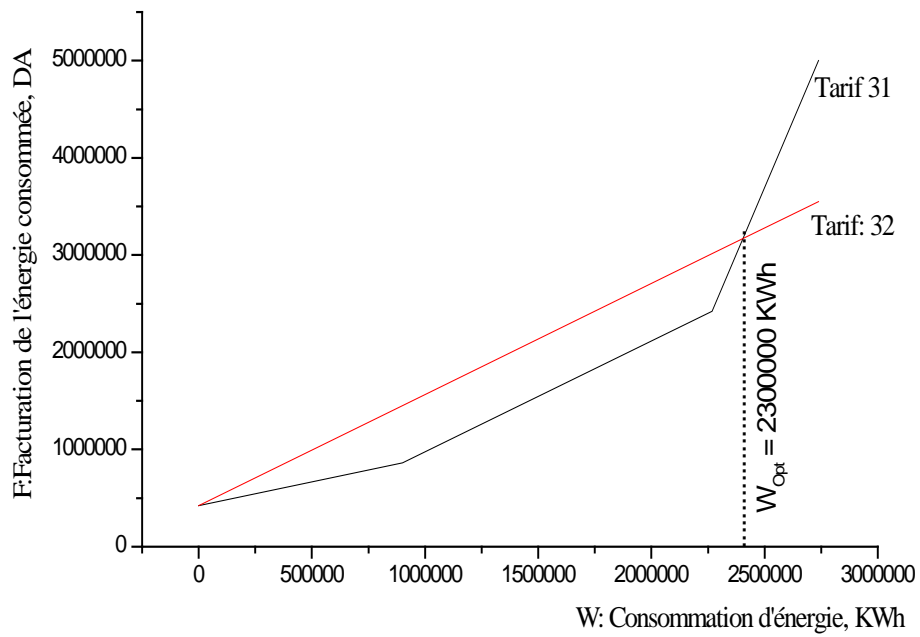


Figure 1.24. Tarif série 30 Abonnée Haute tension énergie consommée

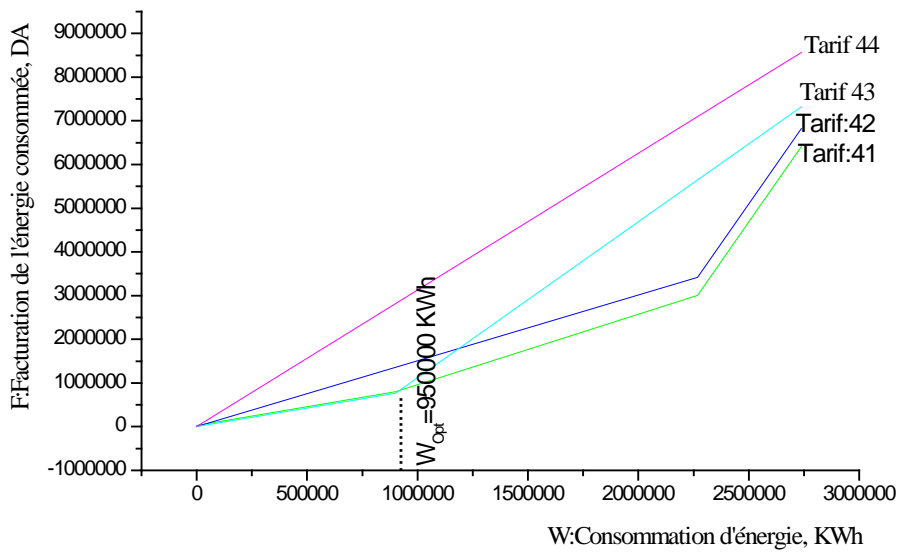


Figure 1.25 Tarif série 40 Abonnée Moyenne tension énergie consommée

Du graphique figure 1.24 relatif à la série 30 abonnée haute tension, on a pu ressortir graphiquement le critère justifiant le choix du tarif économique ( $W_{opt} = 2300000$  KWh ). Au dessus de cette valeur le tarif 32 est plus économique et au contraire le tarif 31 est préférable. De même pour le graphique figure 1.25 relatif à la série 40 abonnées moyennes tension, jusqu' à la valeur ( $W_{opt} = 950000$  KWh ) les tarifs 41 et 43 se sont les plus économiques. Mais au dessus de cette valeur seul le tarif 41 justifiant le choix le plus économique.

### 1.5.5. Conclusions

La valorisation des infrastructures passe en partie par la répartition efficace de leur coût. De plus, on exige souvent qu'une infrastructure se finance par la tarification, en totalité ou du moins en partie. Dans cette thèse, nous avons voulu montrer comment on peut approcher cette question de la manière la plus efficace possible en fixant les prix de manière à se rapprocher le plus possible d'un optimum du tarif monôme.

En pratique, divers contraintes, autres que la contrainte budgétaire, peuvent influencer la tarification, L'approche générale et les principes de tarification que nous avons développés dans cette thèse permettent de considérer des contraintes de toutes sortes.

Un des concepts qui ont été explorés est celui de la tarification à la Ramsey- Boiteux, qui consiste à fixer les prix des différents biens ou services en fonction de l'inverse de l'élasticité de leur fonction de demande. Les tarifs polynômes semblent encore plus intéressants. Ils peuvent être construits comme des menus de différentes composantes, où chaque composante comprend une charge fixe abonnement et de prix relatifs à différentes caractéristiques de la consommation. L'aspect le plus important de cette approche est que les consommateurs ont la liberté de choisir, dans le menu, la composante qui lui convient le mieux.

Par contre cette tarification n'est pas immune aux critiques au plan de l'équité. De plus, dans un contexte concret, il peut être difficile d'avoir toute l'information requise (par exemple l'information sur les demandes) pour calculer les prix de Ramsey- Boiteux. La tâche risque de s'avérer encore plus difficile s'il s'agit d'établir un menu de tarif non linéaires

Par la méthode de différentiation partielle, nous avons obtenu un critère d'optimisation de la fonction structure de tarification appliquée en Algérie voir formule (1.45), qui joue un rôle très important dans la formule tarifaire et qui peut être considéré comme un indice économique. Ce critère représente l'accroissement de l'énergie réactive livrée gratuitement par le producteur d'électricité et l'énergie active consommée par le client qui sera de la forme voir la relation (1.60) . En respectant ce critère, nous pouvons minimiser le tarif qui sera de la forme voir formule (1.62) . De plus, nous avons élaboré des graphiques à l'aide duquel nous pouvons procéder facilement et rapidement au choix du tarif économique respectivement de la série haute et moyenne tension les plus utilisées dans l'industrie Algérienne voir figures 1.24 et 1.25

Nous avons analysé en détaille la formule tarifaire appliquée en Algérie (1.45) et nous avons pu ressortir ce qui suit :

En évitant toute surestimation de la puissance à demander, l'abonné diminuera le montant de ses factures et payera moins chère son énergie.

En évitant les pointes de puissance appelée par l'étalement de sa consommation, l'abonné peut diminuer les coûts de fourniture et payer moins chère son énergie.

En évitant la marche à vide des installations fortement consommatrice d'énergie, le tarif sera diminué de la composante facturant l'énergie réactive consommée et atteint son minimum.

## **CHAPITRE 2.**

### **2.Indices de la consommation de l'énergie électrique**

#### **2.1.Etude des méthodes de calcul du bilan électrique des entreprises**

##### **2.1.1.Bilan de puissance**

Dans le contexte actuel de rationalisation des dépenses nationales, la mise en oeuvre des mesures d'économie d'énergie constitue une voie privilégiée pour permettre aux institutions gouvernementales, commerciales ou industrielles de réduire leur budget d'exploitation énergétique. La mise en oeuvre de programmes de gestion efficace de l'énergie entraîne une réduction potentielle importante des coûts d'exploitation pour les entreprises et institutions. Toutefois, la difficulté d'obtenir le financement nécessaire constitue trop souvent un frein majeur à la concrétisation des activités de maîtrise de l'énergie, qui nécessitent généralement un financement de démarrage important[15,76-78]. C'est pourquoi le calcul du bilan électrique des entreprises industrielles représente la première étape essentielle de l'étude de conception d'un réseau [7,16,52-56].

Dans cette étape nous devons cerner et localiser géographiquement les valeurs des puissances actives et réactives. Selon l'étendu du site, les puissances installées et leurs répartitions, l'installation sera divisée en plusieurs zones géographiques (3 à 8 zones). Le bilan des puissances actives et réactives sera alors fait pour chaque zone en appliquant, aux puissances installées, les facteurs d'utilisation propre à chaque récepteur et le facteur de simultanéité pour le groupement de plusieurs circuits.

Donc, Les charges électriques influencent grandement le transport d'énergie surtout lors du choix de la tension d'alimentation, des sections des lignes, des dispositifs de protection, du nombre ,de la disposition et de la puissance des sous stations de distribution. Par exemple surdimensionné la puissance du transformateur entraîne un investissement excessif et des pertes à vide inutiles. Mais la réduction des pertes en charge peut être très importante. Sous dimensionné le transformateur entraîne un fonctionnement quasi permanent à pleine charge et souvent en surcharge avec des conséquences en chaîne :

- Rendement inférieur (c'est de 50 à 70 % de sa charge nominale qu'un transformateur a le meilleur rendement)
- Echauffement des enroulements, entraînant l'ouverture des appareils de protection et l'arrêt plus ou moins prolongé de l'installation
- vieillissement prématuré des isolants pouvant aller jusqu'à la mise hors service du transformateur ; la norme CEI 354 signale qu'un dépassement permanent de température du diélectrique de 6 °C réduit de moitié la durée de vie des transformateurs immergés.



Aussi, pour définir la puissance optimale d'un transformateur, il est important de connaître le cycle de fonctionnement saisonnier ou journalier de l'installation alimentée, la puissance appelée simultanément ou alternativement par les récepteurs dont les facteurs de puissance peuvent varier dans des proportions considérables d'un récepteur à l'autre et selon l'utilisation.

L'étude des diagrammes de charges et de leurs indices sont la base pour l'élaboration des méthodes de la prévision des charges électriques des entreprises industrielles.

On distingue deux groupes essentiels de ces méthodes :

- 1) Méthodes empiriques : se sont les méthodes basées sur l'examen du régime de fonctionnement des installations électriques ;
- 2) Méthodes probabilistes : se sont les méthodes basées sur la théorie des probabilités.

\* Parmi les méthodes empiriques, la méthode de facteur de demande et celle de la consommation spécifique d'énergie sont les plus utilisées dans l'industrie des mines. Car ces deux méthodes sont avantageées par un calcul moins volumineux et moins de données de départ.

a) Le calcul des charges électriques d'une entreprise de production selon la méthode de facteur de demande est basé sur l'utilisation de la puissance installée et le facteur de demande.

$$P_a = K_d \sum_1^n P_{NI}, KW \quad (2.1)$$

$$Q_r = P_a \operatorname{tg} \varphi_m, KVAR \quad (2.2)$$

Où :

$P_a$  : La puissance active du groupe de consommateurs, KW

$P_{NI}$  : La puissance nominale du consommateur, KW ;

n : Le nombre de consommateurs ;

$Q_r$  : La puissance réactive du groupe de consommateurs, KVAR ;

$\operatorname{tg} \varphi_m$  : Correspond au facteur de puissance moyen du groupe de consommateurs

$$\operatorname{Cos} \varphi_m = \frac{\sum_1^n P_{NI} \operatorname{Cos} \varphi_i}{\sum_1^n P_{NI}}, \quad (2.3)$$

Où :

$\cos\varphi_i$  : Représente le facteur de puissance nominal du  $i^{ème}$  consommateur ;

$K_d$  : Le facteur de demande qui peut être déterminé en utilisant les conditions suivantes :

$$\text{Si } n < 20, \quad \text{alors, } k_d = 0.43 + 0.57 \frac{P_{N \max}}{\sum_{i=1}^n P_{Ni}} \quad (2.4)$$

$$\text{Si } n \geq 20, \quad \text{alors, } K_d = 0.29 + 0.71 \frac{P_{N \max}}{\sum_{i=1}^n P_{Ni}}, \quad (2.5)$$

Où :

$P_{N \max}$  : La puissance du consommateur le plus puissant dans le groupe, KW

b) Le calcul des charges électriques d'une entreprise de production, selon la méthode de la consommation spécifique est basé sur l'utilisation de la production désirée et la consommation spécifique étalonnée .

$$W_a = w_s A, \text{ KWh/ans} \quad (2.6)$$

$$P_a = \frac{W_a}{T_e}, \text{ KW} \quad (2.7)$$

Où :

$W_a$  : L'énergie consommée durant l'année, KWh/ans ;

$w_s$  : La consommation spécifique minimale étalonnée, KWh/Unité de produit ;

$A$  : Le débit de l'entreprise, Unité de production ;

$T_e$  : Le temps de l'emploi de la charge maximale par année

c) Selon les travaux de recherche par voie expérimentale [16], relative au concasseur de la cimenterie de Ain-Touta, la loi de la consommation spécifique établie par la méthode de régression a la forme suivante :

$$w_s = \frac{(76.3219 - 23.4567 * 10^{-3} X_2 - 59.0884 * 10^{-3} X_3 + 390.3518 * 10^{-6} X_2 X_3)}{A}$$

$$-14.2531 * 10^{-3} + 385.3014 * 10^{-6} X_2 + 308.1646 * 10^{-6} X_3 + 9277.1199 * 10^{-9} X_2 X_3, \quad (2.8)$$

KWh/tonne de matière concassée,

Où :

$X_2$  : Propriété technologique (granulométrie de la roche à concasser, m)

$X_3$  : Propriété mécanique (résistance limite au cisaillement de la roche)

\* Parmi les méthodes probabilistes, les méthodes statistiques et celle du facteur du maximum de la charge sont les plus utilisées. Ces méthodes sont avantagées par les résultats sûr.

a) La méthode de facteur de maximum est recommandée si le nombre des consommateurs examinés dans le groupe dépasse le nombre 5, de plus en évitant le groupe des consommateurs dont les puissances et les régimes sont différents. Pour surmonter cette difficulté, en changeant les consommateurs réels par un nombre effectif des consommateurs qui sont similaires d'après leurs régimes de fonctionnement et leurs puissances et qui provoquent la même valeur du maximum de la charge

$$n_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{NI}^2}{\left(\sum_{i=1}^n P_{NI}\right)^2} \quad (2.9)$$

La puissance moyenne sera déterminé en utilisant la relation suivante :

$$P_m = K_u \sum_{i=1}^n P_{NI} \quad (2.10)$$

Où :

$K_u$  : Représente le coefficient d'utilisation, qui peut être déterminé en utilisant la dépendance suivante :

$$K_u = f(n_{ef}) \quad (2.11)$$

Alors, le calcul des charges électriques d'une entreprise ou d'un maillon de production, selon la méthode de facteur de maximum est basé sur l'utilisation de la puissance moyenne et le facteur de maximum.

$$P_a = K_{Max} P_m, KW \quad (2.12)$$

2b) Le calcul des charges électriques par les méthodes basées sur la théorie de probabilités, est recommandé pour les charges électriques dont la variation suit la loi normale.

$$P_{aMax} = P_m (1 + \beta \sqrt{K_f^2 - 1}) \quad (2.13)$$

$$P_{aMin} = P_m (1 - \beta \sqrt{K_f^2 - 1}) \quad (2.14)$$

$$K_f = \frac{P_{mq}}{P_m} \quad (2.15)$$

Où :

$P_m$  : La puissance moyenne pendant une période déterminée ;

$\beta$  : Coefficient tenant compte du rapport du temps du maximum adopté de la charge électrique ( $T_{Max}$ ) au temps de la période déterminée ;

$K_f$  : Coefficient de forme du graphique de la charge électrique ;

$P_{mq}$  : Représente la puissance moyenne quadratique pendant une période déterminée, KW.

La méthode d'estimation de la puissance optimale du transformateur peut être présentée de la manière suivante :

On établit un bilan de puissances appelées par le réseau et on prend en compte tous les récepteurs installés alimentés par le transformateur y compris les installations mobiles.

Or La puissance installée donne en général une valeur trop élevée par rapport au besoin réel, car tous les récepteurs ne fonctionnent pas en même temps ni à pleine charge. Aussi, on applique aux puissances des récepteurs des coefficients qui tiennent compte de leur régime de fonctionnement. Cette puissance est évaluée en prenant en compte le rendement et le facteur de puissance, soit des divers récepteurs ou groupes de récepteurs, soit de l'installation.

Alors, la puissance appelée ( $S_a$ ) s'exprime par :

$$S_a = \frac{\sum^n P_{Ni} K_u K_S}{\eta \cos \varphi_m}, KVA \quad (2.16)$$

Où :

$K_S$  : coefficient de simultanéité

$\eta$  : le rendement

Pour tenir compte des pics de consommation éventuels, nous déterminons la journée la plus chargée de l'année, c'est-à-dire celle où, en plus des récepteurs habituels, viennent s'ajouter des appareils à leur charge maximum.

Il convient de découper cette journée en différentes tranches horaires et, pour chaque tranche horaire ainsi définie, de faire le bilan de la puissance des récepteurs fonctionnant simultanément pendant cette période. Plus clairement voir la représentation graphique des courbes de fonctionnement de l'installation avec charge nivelée figure 2.1. et avec charge de pointes figure 2.2. ci-dessous.

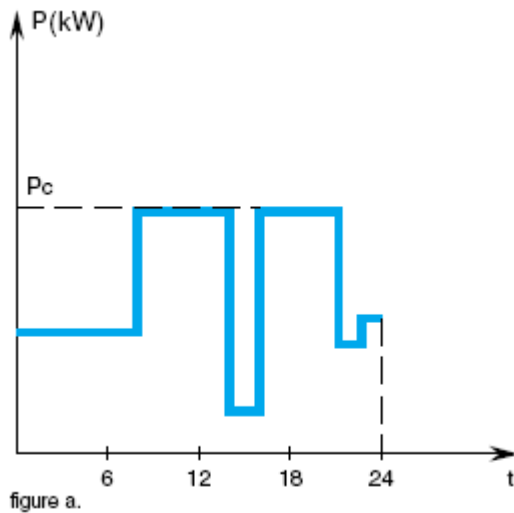


Figure 2.1 Courbe de fonctionnement normale Avec charge nivelée

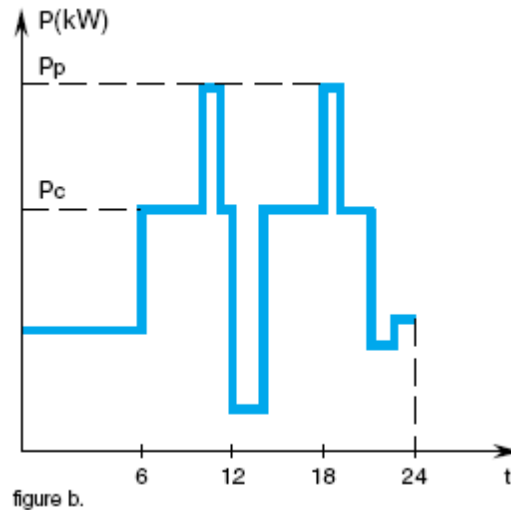


Figure 2.2. courbe de fonctionnement avec charge de pointes

La lecture de la courbe de fonctionnement détermine la puissance maximale consommée ( $P_{con}$ ), exprimée en kW. Si la puissance maximale consommée correspondait à un pic passager de courte durée (entre quelques minutes et 2 heures maximum), il serait possible de la considérer comme une surcharge passagère (courbes de surcharges admissibles du transformateur) de façon à ne pas sur calibrer inutilement la puissance. Ceci apparaît dans la figure 2.2..

Si, la puissance maximale utilisée ( $P_{ut}$ ) et la puissance maximale consommée ( $P_{con}$ ) ont des valeurs du même ordre de grandeur, on choisit la valeur la plus élevée. Soit, ( $P_{Max}$ )

La puissance appelée maximale correspondante est obtenue en calculant  $S_{Max}$ , de la manière suivante :

$$S_{Max} = S_a \frac{P_{Max}}{P_{ut}} \quad (2.17)$$

$P_{Max} / P_{ut}$  : coefficient correspondant à la prise en compte du surplus de puissance nécessaire par rapport à la consommation normale.

### 2.1.2.Choix final de la puissance du transformateur

On choisira en principe le transformateur de puissance apparente S(KVA) normalisée immédiatement supérieure à  $S_{Max}$  déterminé précédemment. Néanmoins, il faut prendre en compte pour ce choix les éléments suivants :

1) Sûreté de fonctionnement : si l'installation ne comprenait qu'un seul transformateur, il serait prudent de sur calibrer  $P_{Max}$  de l'ordre de 25 %

2) Influence de la température

3) Extension ultérieure : si elle est prévue, en tenant compte dans la détermination de  $P_{Max}$

4) Facteur de puissance : il doit être ramené, côté entrée réseau, à 0,894 pour éviter les pénalités appliquées par le distributeur d'énergie :

### **2.1.3.Surcharges des transformateurs**

Pour ne pas provoquer un vieillissement prématuré du transformateur les surcharges brèves ou prolongées que l'on peut admettre doivent être compensées par une charge "habituelle" plus faible. Les courbes qui suivent permettent de déterminer les surcharges journalières ou brèves admissibles en fonction de la charge habituelle du transformateur.

Le chiffre en regard de la flèche précise, pour chaque courbe de surcharge, le rapport souhaitable entre la charge habituelle et la puissance nominale pour pouvoir tolérer la surcharge indiquée par la courbe.

Les courbes sont données pour la température ambiante normale

- 1) température ambiante de fonctionnement : -25 °C à +40 °C
- 2) température ambiante moyenne mensuelle du mois le plus chaud : 30 °C
- 3) température ambiante moyenne annuelle : 20 °C

#### **a) Surcharges cycliques journalières**

Suivant la température ambiante du local dans lequel sera installé l'unité de transformation une surcharge journalière importante et prolongée peut être admise sans systématiquement compromettre la durée de vie du ou des transformateurs en parallèle.

Les courbes de surcharges cycliques journalières figure 2.3 et 2.4 ci-dessous correspondent aux conditions de température ambiante, indiquée plus haut respectivement du transformateur immergé et à sec

Pour un transformateur immergé voir figure 2.3 chargé toute l'année à 80 % on lit sur la courbe correspondant au coefficient 0,8 une surcharge journalière admissible d'environ 120 % pendant 4 heures ou encore, 135 % pendant 2 heures.

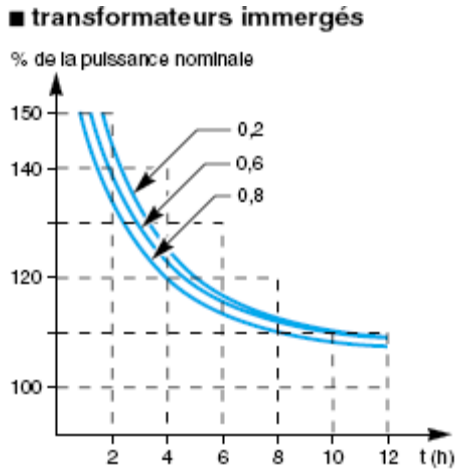


Figure 2.3. Courbe de charge et surcharge Cyclique en fonction de la Puissance nominale Cas du transformateur immergé

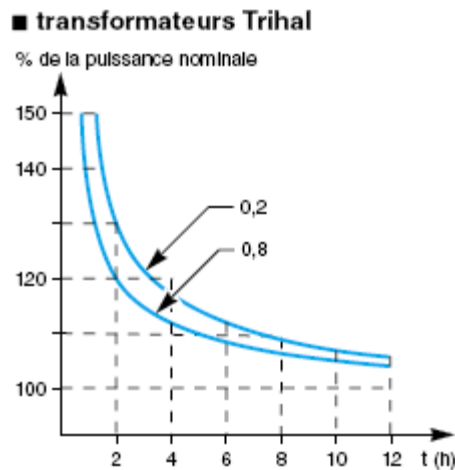


Figure 2.4. Courbe de charge et surcharge cyclique en fonction de la puissance nominale cas du transformateur à sec

## b) Surcharges brèves admissibles

De même lors des manoeuvres des récepteurs, des surcharges brèves mais très importantes peuvent apparaître (par exemple : démarrage de moteur).

Elles sont également admissibles sous réserve qu'elles ne dépassent pas les limites indiquées par les courbes figure 2.5. et 2.6 ci-dessous.

Pour un transformateur sec chargé toute l'année à 70 % on lit sur la courbe correspondant au coefficient 0,7 une surcharge brève admissible d'environ 10 In pendant 10 secondes ou encore, 5,2 In pendant 30 secondes.

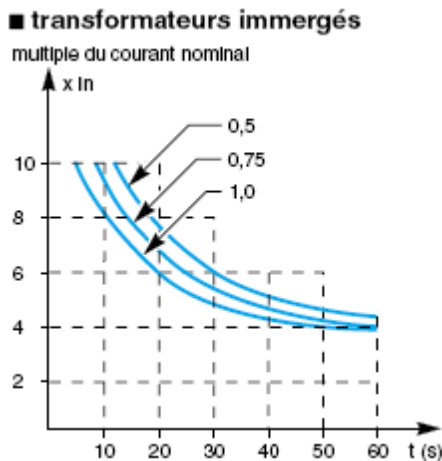


Figure 2.5 Courbe de surcharge brèves admissibles transformateurs immergés

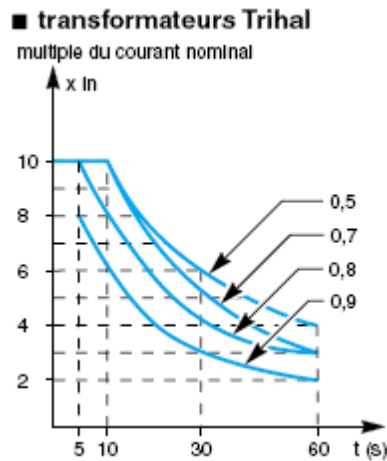


Figure 2.6. Courbe de surcharge brèves admissibles transformateurs à sec

## 2.2.Principaux indices de la consommation de l'énergie électrique

Parmi les principaux indices énergétiques, qui caractérisent le réseau électrique on distingue :

- Facteur de puissance ;
- Dépenses spécifiques d'énergie électrique;
- Degré d'approvisionnement en énergie du travail ;
- Minimum des dépenses réduites des installations
- Maximisation du rendement des installations électriques et de production ;

### 2.2.1. Facteur de puissance moyen comme indice principal de consommation

A partir de l'énergie consommée active et réactive d'un maillon ou d'une entreprise, nous pouvons déterminer le facteur de puissance, qui caractérise la proportion de la puissance transformée en énergie utile par rapport à la puissance totale transmise. Le but est de supprimer l'énergie réactive qui est facturée, si elle dépasse 50 % de l'énergie active absorbée, pendant les heures de pointe, pleines et de nuit, pendant une période déterminée :par exemple un mois. En utilisant la relation suivante :

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + V_r^2}} = \frac{W_a}{\sqrt{1 + \left[\frac{V_r}{W_a}\right]^2}}, \quad (2.18)$$

Où :

$W_a$  : Energie électrique active consommée pendant une période déterminée, KWh/mois

$V_r$  : Energie électrique réactive consommée pendant une période déterminée, KVAr/mois

En général, les distributeurs d'énergie électrique pénalisent financièrement les consommateurs dont la valeur de  $\tan \varphi$  est élevée. Par exemple, en Algérie :les clients payent l'énergie réactive au-delà de 50 % de l'énergie active consommée selon la relation suivante :

$$Dr = g(V_r - 0.5W_a), DA \quad (2.19)$$

Où :

$g$  : Le prix unitaire de l'énergie réactive DA/KVAr



C'est la raison pour laquelle nous avons recours à la compensation d'énergie réactive qui nous permet de réduire la prime fixe en diminuant la puissance apparente souscrite. Ainsi, la compensation de la puissance réactive nous permet de faire des économies sur la facture d'énergie ;

De plus, elle nous permet de réduire les pertes joules et les chutes de tension dans les conducteurs et les transformateurs.

- La chute de tension dans un câble ou un transformateur triphasé s'exprime de la façon suivante :

$$\Delta V = \sqrt{3}I(R\cos\varphi + X\sin\varphi), V \quad (2.20)$$

- Les pertes joules dans les câbles sont exprimées par l'expression suivante :

$$\Delta P_C = R \left[ \frac{P}{U\cos\varphi} \right]^2, W \quad (2.21)$$

Où :

R : Résistance du conducteur,  $\Omega$  ;

X : Réactance du conducteur,  $\Omega$

P : Puissance active transmise, W ;

U : Tension appliquée, V

I : Le courant traversant le conducteur, A

$\cos\varphi$  : Facteur de puissance moyen calculé en fonction de l'énergie active et réactive consommée

- Les pertes joules dans les transformateurs sont exprimées par l'expression suivant :

$$\Delta P_r = P_{cc} \left[ \frac{P}{S_N \cos\varphi} \right]^2, W \quad (2.22)$$

Où :

$P_{cc}$  : Pertes de court circuit, W ;

$S_N$  : Puissance nominale du transformateur, VA

### 2.2.2. Dépenses spécifiques d'énergie électrique

L'énergie électrique consommée rapportée à la tonne traitée, représente l'élément essentiel du prix de revient opératoire, qui nous permettra de se renseigner sur le régime de fonctionnement des installations de production d'une part et d'autre part de savoir le taux de

participation de l'énergie dans le coût de production, le taux d'utilisation du potentiel humain et matériel. Cette indice peut être déterminé en utilisant l'expression suivante :

$$W_s = \frac{W_c}{Q_p}, KWh/tonne \quad (2.23)$$

Où :

$W_c$  : Energie consommée par mois ;

$Q_p$  : Production , tonne/ mois

### 2.2.3. Degré d'approvisionnement en énergie du travail

Le degré d'approvisionnement en énergie du travail détermine la quantité d'énergie électrique dépensé pour un processus technologique rapportée à la quantité du travail dépensé en Hommes Heures pendant un temps déterminé. Cette indice est déterminé selon la relation suivante :

$$a_{et} = \frac{W_c}{n_p T_p N_j}, KWh/hh \quad (2.24)$$

Où :

$n_p$  : Nombre du personnel titulaire ;

$T_p$  : Durée du poste, h ;

$N_j$  : Nombre de journée de travail par mois, Jours/mois ;

$hh$  : Unité de mesure du degré d'approvisionnement, hommes heures

### 2.2.4. Minimisation des dépenses réduites relatives aux installations électriques et de production

Pour estimer l'efficacité de la consommation d'énergie électrique, on introduit un indice technico-économique qui nous permettra de décider où non sur le choix optimal des paramètres de réglage d'une installation ou bien de décider sur le choix entre l'achat et le remplacement des éléments de production.

En conséquent, le choix de la mesure optimale de l'économie d'énergie électrique, s'effectue en vertu de la comparaison technico-économique des dépenses réduites relatives aux différentes variantes, établies sur la base de la formule suivante :

$$Z = f(k) + c(P), DA/an, \quad (2.25)$$

On sait que les dépenses réduites de chacune des variantes formule (2.25), regroupe les dépenses relatives à l'investissement  $f(k)$  et les dépenses relatives aux pertes d'énergie de l'exploitation courante  $c(p)$ . Ces deux expressions respectivement, nous les avons formulées de la manière suivante :

$$f(k) = k(\theta + Pnorm), DA/an ; \quad (2.26)$$

$$c(P) = \Delta P.Ta.Co, DA/an \quad (2.27)$$

Où:

$k$  : Dépenses d'investissement, DA ;

$\theta$  : Norme d'amortissement ;

$Pnorm$  : Coefficient normatif de l'efficacité économique ;

$\Delta P$  : Pertes de puissance, KW ;

$Ta$  : Nombre des heures de travail effective par an, h/an ;

$Co$  : Prix unitaire de l'énergie électrique , DA/KWh.

Donc, la forme de l'équation (2.25) peut à présent s'écrire :

$$Z = k(\phi + Pnorm) + \Delta P.Ta.Co, DA/an \quad (2.28)$$

Si les variantes à comparer n'assurent pas les exigences de la qualité demandé, alors, on complète la formule (2.28) par d'autres paramètres qui sont liées à l'interruption d'énergie électrique et aux arrêts de travaux ( $y_{int}$ ) et aux dommages provenant des chutes de tension ( $y_{chut}$ ).

$$Z = k(\phi + Pnorm) + \Delta P.Ta.Co + y_{int} + y_{chut}, DA/an \quad (2.29)$$

Les valeurs de  $y_{int}$  et de  $y_{chut}$  sont déterminées en vertu des expressions suivantes :

$$y_{int} = wa.y_m, DA/an \quad (2.30)$$

$$y_{chut} = (k_1.\mu_m + k_2.\mu_{mq})wa, DA/an , \quad (2.31)$$

Où:

$wa$  : Energie électrique consommée , KWh/an

$y_m$  : Dommage spécifique moyen , DA/KWh ;

$k_1$  et  $k_2$  : Coefficients qui dépendent du type de consommateur ;

$\mu_m$  et  $\mu_{mq}$  : Représentent, respectivement les déviations de la tension moyenne et de la moyenne quadratique sur les jeux de barre des consommateurs

L'équation des dépenses spécifiques découlant de la formule (2.28) peut être présentée à l'aide de la relation suivante :

$$Z_s = C1.A + \frac{C2}{A} + C3, DA/unité.de.production \quad (2.32)$$

Où :

A : Production annuelle de l'entreprise, t/an

Le relation (2.32) représente la forme générale du modèle mathématique du critère d'optimisation, que nous avons obtenu, formulé pour la première fois et sa proposition dans cette thèse est très utile pour rechercher de l'économie d'énergie électrique aux conditions de la consommation optimale

Alors, les valeurs des coefficients C1, C2 et C3 du modèle mathématique proposé, peuvent être déterminés en utilisant les données financières respectivement des dépenses relatives aux pertes d'énergie électriques de l'exploitation courante et de l'investissement en fonction des réserves industrielles ( $Q_i$ ). Soit exprimant de deux ou plusieurs variantes à comparer, composées de la manière suivante :

$$\begin{array}{l} 1^{ère} \text{ variante : } \quad A1 \text{ -----} > \quad c(p1) \text{ -----} > f(k1) \\ 2^{ème} \text{ variante : } \quad A2 \text{ -----} > \quad c(p2) \text{ -----} > f(k2) \end{array}$$

Après avoir arrêté les productions (A1) et (A2) du projet et les valeurs  $f(k1)$ ,  $f(k2)$ ,  $c(p1)$  et  $c(p2)$  déterminées à l'aide des équations (2.26) et (2.27), nous pouvons composer les deux systèmes d'équation suivants :

a) Système d'équation relative aux pertes d'énergie électrique

$$c(p1) = q' . A1 + q'', \quad DA/an ; \quad (2.33)$$

$$c(p2) = q' . A2 + q'', \quad DA/an ; \quad (2.34)$$

b) Système d'équation relative aux investissements

$$f(k1) = k' . n_v . A1 + k'', \quad DA ; \quad (2.35)$$

$$f(k2) = k' . n_v . A2 + k'', \quad DA ; \quad (2.36)$$

La résolution de ces deux systèmes d'équation donnent les grandeurs  $q'$ ,  $q''$ ,  $k'$  et  $k''$ .

Où :

$q'$  : Coefficient qui représente les dépenses spécifique relatives aux pertes d'énergie électrique non lié à la productivité de l'entreprise, DA/t ;

$q''$  : Coefficient qui dépend du degré de variation des pertes d'énergie électrique au fur et à mesure de l'augmentation de la productivité de l'entreprise, DA/an ;

$k'$  : Coefficient qui représente les dépenses spécifiques relatives aux investissements et qui dépend de la productivité de l'entreprise, DA/t ;

$k''$  : Coefficient qui représente les dépenses relatives à l'investissement non lié à la productivité de l'entreprise, DA/an

$n_v$  : Durée de vie de l'entreprise, ans

les dépenses spécifiques relative aux pertes d'énergie et à l'investissement peuvent être déterminer, en utilisant les relations suivantes :

$$Z_s = \frac{(q'A + q'')}{A} + \frac{(k'n_v A + k'')}{Q_i}, DA/t \quad (2.37)$$

$$Z_s = q' + \frac{k''}{Q_i} + \frac{q''}{A} + \frac{k'n_v}{Q_i} A, DA/t \quad (2.38)$$

Où :

$Q_i$  : Réserves industrielles de l'entreprise projetée, tonne

Après traitement :

$$C1 = \frac{n_v k'}{Q_i}, DAan/t^2 \quad (2.39)$$

$$C2 = q'', DA/an \quad (2.40)$$

$$C3 = q' + \frac{k''}{Q_i}, DA/t \quad (2.41)$$

Alors, le problème se réduit à trouver le minimum du critère d'optimisation des dépenses spécifique ( $Z_s$ ) du modèle proposé (2.38), dépendant de la variable indépendante (A).

La méthode de calcul différentiel donne des résultats utiles et rapides, peut être utilisée pour extraire de notre critère d'optimisation une autre équation qui nous donne la valeur optimale de notre variable (A).

Nous différencions donc, ( $Z_s$ ) par rapport à (A), nous obtenons :

$$A_{opt} = \sqrt{\frac{q'' Q_i}{n_v k'}}, t \quad (2.42)$$

En remplaçant la valeur de la charge optimal (2.42), dans l'équation (2.38), on obtient les dépenses spécifiques minimales :

$$Z_s \min = \frac{n_v k' A_{opt}}{Q_i} + \frac{q''}{A_{opt}} + q' + \frac{k''}{Q_i}, DA/t \quad (2.43)$$

Plus clairement, cette équation est présentée à l'aide du graphique figure.2.4

De l'égalité suivante, on tire le gain spécifique réalisé :

$$E_s = Z_s(A) - Z_s(A_{opt}), DA/t \quad (2.44)$$

Le gain réalisé relative aux dépenses réduites est déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$Er = \frac{Z_s(A) - Z_s \min(A_{opt})}{Z_s(A)} \% , \quad (2.45)$$

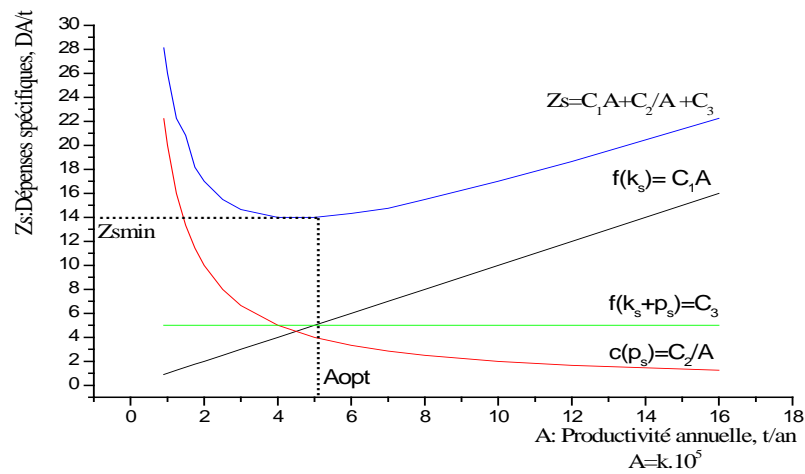


Figure 2.7. Relation entre les dépenses spécifiques et la productivité annuelle

- 1 : Critère d'optimisation des dépenses spécifiques
- 2 : partie variable des investissements au fur et à mesure de l'augmentation de la productivité annuelle de l'entreprise ;
- 3 : Partie variable des pertes d'énergie au fur et à mesure de l'augmentation de la productivité annuelle de l'entreprise ;
- 4 : Partie constante relative aux pertes d'énergie et à l'investissement

La valeur minimale des dépenses réduites obtenue, ainsi que la productivité optimale correspondante seront prises en considération durant l'élaboration du projet.

## 2.2.5. Maximisation du rendement.

### 2.2.5.1. Maximisation du rendement en fonction de la puissance transmise

Si, pour un certain régime de fonctionnement d'une installation, le rendement théorique où d'exploitation en fonction des pertes ( $P_t$ ) et de la puissance utile ( $P_u$ ) est donné par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_t} = 1 - \frac{P_t}{P_u + P_t} = 1 - \frac{1}{\frac{P_u}{P_t} + 1}, \quad (2.46)$$

Les pertes croissant avec la charge sont proportionnelles à  $I^2$ , donc à  $U^2 I^2$  (puisque la tension  $U = \text{constante}$ ) et les pertes à vide sont constantes et connues. Alors les pertes totales peuvent s'exprimer par la relation suivante :

$$P_t = b_0 U^2 I^2 + c_0, W \quad (2.47)$$

Posons en effet :

$$S_c = UI, VA \quad (2.48)$$

$$P_t = b_0 S_c^2 + c_0 = p_{cc} \frac{S_c^2}{S_N^2} + P_v \quad (2.49)$$

$$P_u = S_c \cos \theta \quad (2.50)$$

Où :

$S_c$  : Puissance apparente transmise par l'installation électrique, KVA ;

$\cos \theta$  : facteur de puissance ;

$P_{cc}$  : les pertes de court circuits, W

$b_0$  : désignant un coefficient de proportionnalité ;

$c_0$  : pertes indépendante de la charge sont égales aux pertes à vide ( $P_v$ ), W

La relation (2.46) devienne

$$\eta = \frac{S_c \cos \theta}{S_c \cos \theta + b_0 S_c^2 + c_0} = \frac{S_c}{S_c + \frac{b_0 S_c^2 + c_0}{\cos \theta}} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta + b_0 S_c + \frac{c_0}{S_c}}, \quad (2.51)$$

La courbe du rendement figure 2.8. ci-dessous, c'est le graphe qui donne, en marche industrielle ( $U = \text{Cte}$  et  $f = \text{Cte}$ ) le rendement vrai d'une machine en fonction de la puissance apparente (machines à  $\cos \theta$  réglable) ou de la puissance utile (machine à  $\cos \theta$  non réglable). Cette courbe donne lieu à des observations importantes :

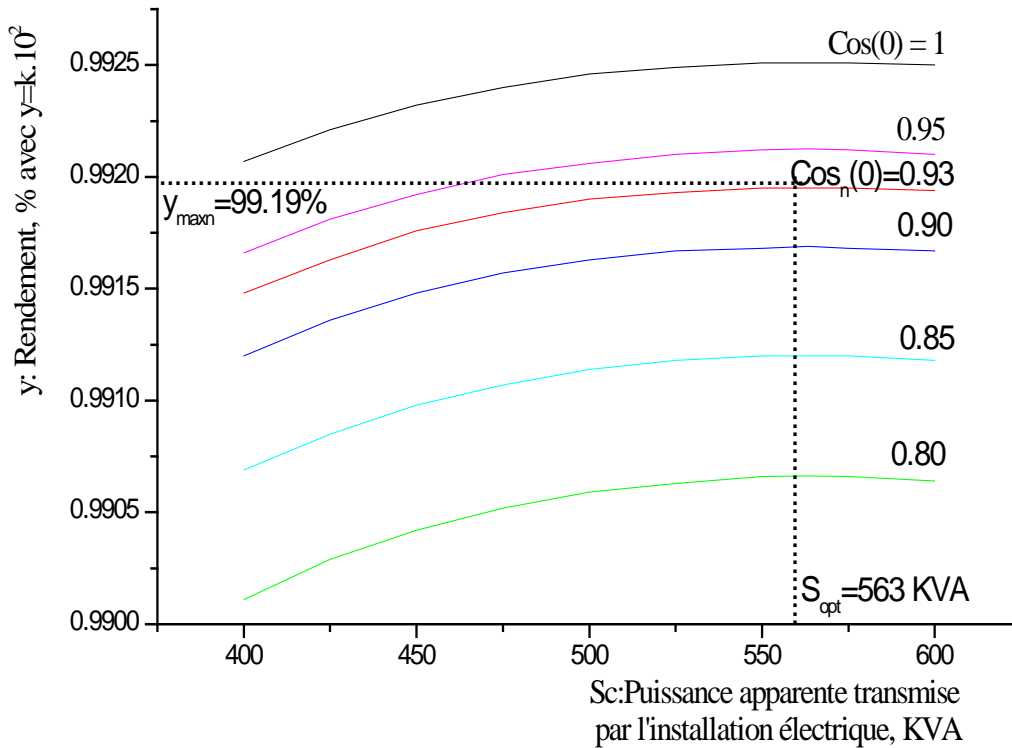


Figure2.8 . Courbe du rendement en fonction de la puissance apparente transmise et du facteur de puissance

1°) Dans les machines à facteur de puissance réglable, il y a autant de courbes de rendement que de facteurs de puissance. Nous voyons que, pour une même puissance apparente ( $S_c$ ), le rendement est d'autant meilleur que ( $\cos \theta$ ) est plus grand.

2°) Dans les machines à facteur de puissance constant ou à courant continu, son allure peut être prévue. En effet la courbe  $\eta = f(S_c)$  du rendement en fonction de la puissance apparente suppose un facteur de puissance constant. De l'expression (2.51) le rendement prend la forme :

$$\eta = \frac{a_0 S_c}{a_0 S_c + b_0 S_c^2 + c_0}, \quad (2.52)$$

Où :

$a_0$  : Coefficient de proportionnalité est égale à  $\cos \theta$



Alors, le graphe  $\eta = f(S_c)$  s'en déduit aisément figure 2.9 est :

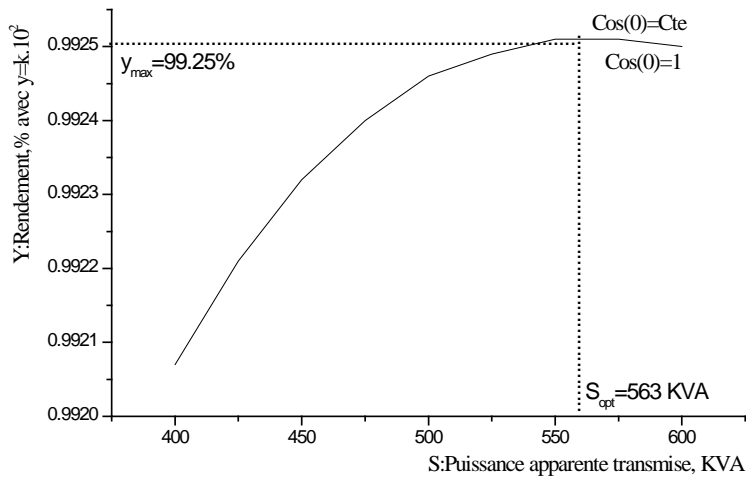


Figure 2.9 Courbe du rendement en fonction de la puissance apparente transmise et du facteur de puissance constant  $\text{Cos } \theta = 1$

Le rendement est nul pour ( $S_c = 0$ ), faible pour ( $S_c$ ) très grand après être passé par un maximum. Ces conclusions sont valables pour les machines à courant continu ( $\text{Cos } \theta = 1$ ). L'allure de la courbe de rendement est la même pour les machines dont le facteur de puissance est réglable

3°) Son maximum a lieu lorsque les pertes croissant avec la charge deviennent égales aux pertes indépendants de la charge. Lorsqu'on a ( $\text{Cos } \theta = \text{Cte}$ ), l'expression du rendement peut s'écrire ( $a_0 = \text{Cos } \theta$ ) :

$$\eta = \frac{a_0}{a_0 + b_0 S_c + \frac{c_0}{S_c}}, \quad (2.53)$$

Le rendement est maximale pour la valeur de ( $S_c$ ) telle que la somme ( $b_0 S_c + \frac{c_0}{S_c}$ ) soit minimale.

Après traitement, on peut écrire l'expression de la charge optimale :

$$S_{opt} = \sqrt{\frac{c_0}{b_0}}, \quad (2.54)$$

L'expression du rendement maximale :

$$\eta_{\max} = \frac{a_0}{a_0 + 2\sqrt{b_0 c_0}}, \quad (2.55)$$

## a) Rendement pratique

La courbe de rendement (rapport de puissance) montre que ce rendement, variant avec la charge est essentiellement variable d'un instant à l'autre comme la charge elle-même de la machine en exploitation. Le rendement « rapport de puissance » est donc un rendement instantané. Ce qui intéresse l'utilisateur qui achète de l'énergie et qui la transforme est le rendement moyen ou pratique d'utilisation :

$$\eta_{prat} = \frac{wu}{wa}, \quad (2.56)$$

Où :

$Wu$  : Energie utilisée, KWh ;

$Wa$  : Energie absorbée (payée)

Pendant un temps  $t$  déterminé, le rendement sera

$$\eta_{prat} = \frac{\int_0^t a_0 S c dt}{\int_0^t a_0 S c dt + \int_0^t b_0 S c^2 dt + \int_0^t c_0 dt}, \quad (2.57)$$

Et le rendement pratique d'utilisation dans le temps ( $t$ ) est maximale quand on réalise l'égalité :

$$\int_0^t b_0 S c^2 dt = \int_0^t c_0 dt = c_0 t, \quad (2.58)$$

Autrement dit lorsqu'on réalise, pendant le temps( $t$ ), l'égalité :

Energie perdue par pertes constantes = Energie perdue par pertes proportionnelles au carré de la charge.

Soit une machine de puissance nominale

## b)Condition de rendement pratique maximal

Le rendement pratique d'une machine est maximal quand sa puissance de rendement maximal est égal à la puissance thermiquement équivalente définie par son utilisation. ( $S_N = 1000KVA$ ) et de facteur de puissance ( $\cos\theta = a_0 = 0.93$ ), dont la courbe de charge réelle ( $P_u$ ), nominale ( $P_n$ ), les pertes à vide ( $P_v$ ) et en charge ( $P_c$ ) pendant le temps ( $t$ ) sont présentées voir figure 2.10

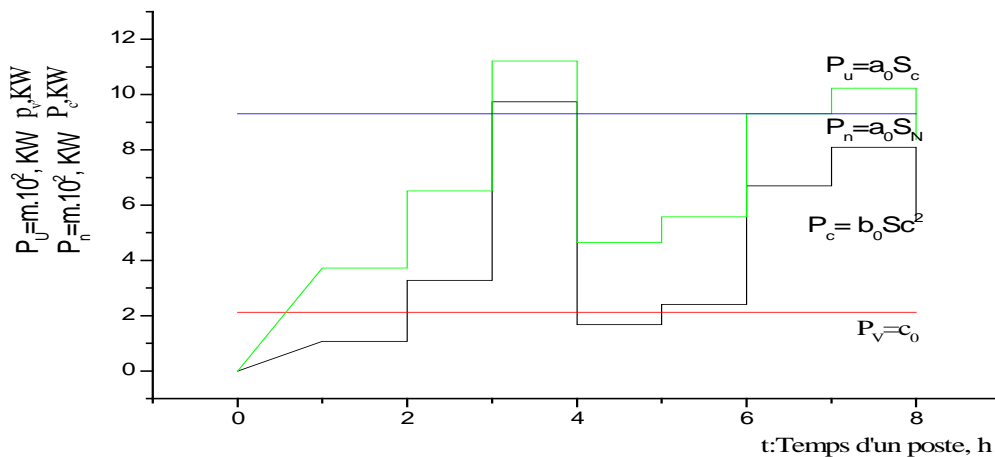


Figure 2.10. Caractéristiques électriques d'une machine

1°) Eu égard à l'utilisation, le rendement pratique du transformateur est maximal quand on a :

$$c_0 \cdot t = b_0 \int_0^t S c^2 dt = b_0 S_{th}^2 \cdot t \quad (2.59)$$

$$c_0 = b_0 S_{th}^2 \quad (2.60)$$

2°) Eu égard à la construction le rendement instantané du transformateur est maximal à la puissance ( $S_0$ ) telle que l'on ait :

$$c_0 = b_0 S_0^2 \quad (2.61)$$

Donc la machine la mieux adaptée (quant au rendement pratique) à l'utilisation prévue est celle dont la puissance ( $S_0$ ) de rendement (instantané) maximal est égale à la puissance thermiquement équivalente dans l'utilisation à condition que la puissance nominale de la machine permet d'assurer, sans risque l'échauffement et les pointes de puissance demandées.

### 2.2.5.2. Accroissement du rendement avec les dimensions d'une machines.

Par hypothèse les pertes dans le fer, elles se produisent dans tous les organes de machines où le flux est variable. Elles sont proportionnelles au volume du fer dans lequel elles se produisent. En effet, si on accroît les dimensions linéaires dans le rapport de (1 à m), les pertes croissent dans le rapport de (1 à  $m^3$ ). Alors, la perte de puissance est donnée par la formule :

$$P_v = 10^{-2} \cdot k_H \cdot f \cdot B_m^2 + \frac{\Pi^2}{6\rho} e^2 B_m^2 f^2 V, \quad \text{W /kg} \quad (2.62)$$

Où :

$k_H$  : Coefficient qui dépend de la qualité des tôles ;

$f$  : Fréquence du réseau, Hz ;

$B_m$  : Induction magnétique, Tesla ;

$\rho$  : Résistivité,  $\Omega m$  ;

$e$  : Epaisseur des tôles, mm ;

$V$  : Volume du fer,  $m^3$

Mais le volume  $V$  est proportionnelle à la masse ( $M$ ) et par conséquent les pertes ( $P_v$ ) l'est aussi. Plus clairement voir la dépendance figure 2.11. ci-dessous. Donc la relation des pertes (2.62) en fonction de la masse sera exprimée de la manière suivante :

$$P_v = k_H \cdot f \cdot B_m^2 \cdot 10^{-2} + \frac{\Pi^2}{6\rho} e^2 B_m^2 f^2 \frac{M}{\mu}, \quad \text{W /kg} \quad (2.63)$$

De même, le courant  $I = f(J, s)$  et la tension  $U = f(B_m, s)$  croissent les deux dans le rapport de (1 à  $m^2$ ). Alors la puissance ( $S = U \cdot I$ ), croissent dans le rapport de (1 à  $m^4$ ).

Alors, la puissance en fonction de la masse ( $M$ ) prend la forme suivante :

$$S = k B_m J \frac{M^{4/3}}{\mu^{4/3}}, \quad \text{VA} \quad (2.64)$$

Où :

$S$  : Puissance apparente calculée de l'installation électrique, KVA ;

$K$  : Coefficient qui dépend du métal ;

$\mu$  : Densité du métal,  $kg / m^3$  ;

$J$  : Densité du courant,  $A / m^2$  ;

$M$  : La masse du fer.

En définitive, la puissance croît plus vite que les pertes quand on augmente dans un même rapport, les dimensions d'une machine voir figure 2.11. Dès lors son rendement s'améliore. Dans une même série, les grosses machines ont un meilleur rendement que les petites.

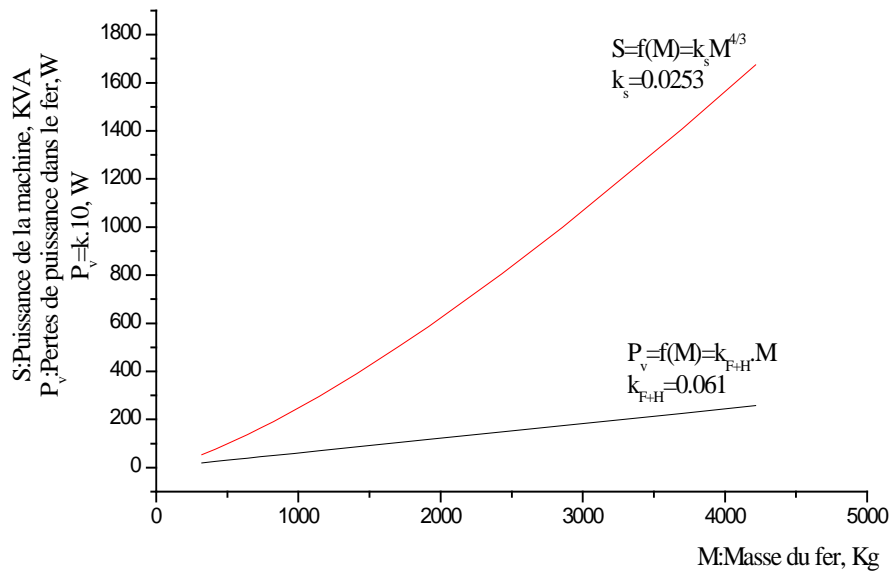


Figure 2.11. Relation entre la masse du fer, les pertes et la puissance de la machine

De la relation (2.64), on tire la caractéristique de la puissance de la machine rapportée à la masse.

$$S_s = k B_m j \frac{M^{1/3}}{\mu^{4/3}}, VA / kg \quad (2.65)$$

Plus clairement, cette caractéristique est présentée voir figure 2.12

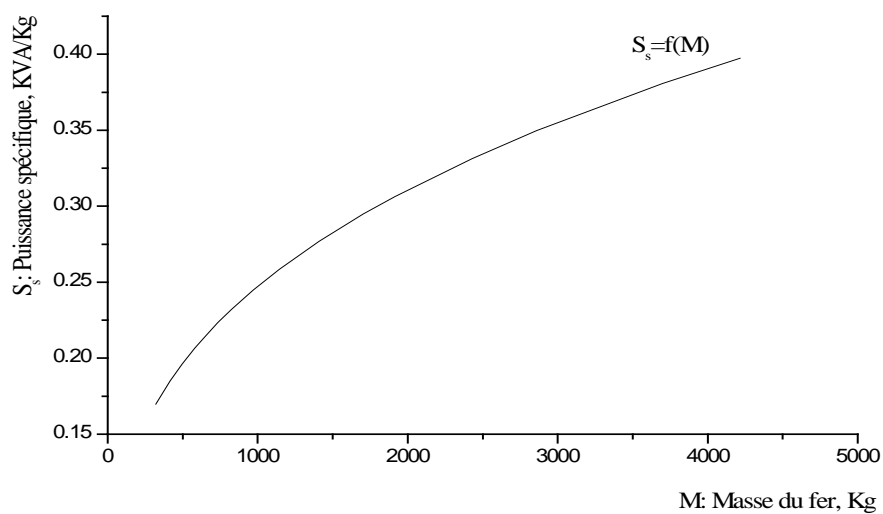


Figure 2.12. Relation entre la masse du fer et la puissance spécifique de la machine

## 2.2.6.Optimisation du facteur de charge

Si, pour un certain régime d'une installation, le facteur de charge qui est le rapport d'un paramètre physique (puissance apparente ( $S_c$ ) à l'instant ( $t$ ) à une constante de la machine (puissance nominale  $S_N$ ), représente le paramètre technique, est donné par le rapport suivant :

$$n_c = \frac{S_c}{S_N} \quad (2.66)$$

### A) Méthode du rendement

En référant à la relation (2.46) et en remplaçant la puissance utile ( $P_u$ ) et les pertes ( $P_t$ ) respectivement voir les relations (2.50) et (2.49), le rendement peut à présent s'écrire :

$$\eta = 1 - \frac{P_v + n_c^2 P_{CC}}{n_c S_N \cos \theta + P_v + n_c^2 P_{CC}}, \quad (2.67)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\frac{n_c S_N \cos \theta}{P_v + n_c^2 P_{CC}} + 1} = 1 - \frac{1}{\frac{S_N \cos \theta}{\frac{P_v}{n_c} + n_c P_{CC}} + 1}, \quad (2.68)$$

Et la condition du rendement maximale :

$$P_v = n_c^2 P_{CC}, \quad (2.69)$$

Conduit à l'expression du facteur de charge optimal

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{P_v}{P_{CC}}}, \quad (2.70)$$

### B) Méthode de la consommation spécifique

En référant à la relation des pertes de puissance (2.49) et nous divisons les membres de cette équation par la charge transmise ( $S_c$ ), nous obtenons ainsi, l'équation des pertes spécifiques.

$$P_{ts} = \frac{P_t}{S_c} = \frac{P_v}{S_c} + \frac{P_{CC}}{S_N^2} S_c, \quad (2.71)$$

Par la méthode de différentiation et en utilisant la même variable ( $S_c$ ), nous pouvons ressortir le critère d'optimisation de la charge optimale

$$S_{c_{opt}} = S_N \sqrt{\frac{P_v}{P_{CC}}}, \quad (2.72)$$

Cette nouvelle expression tirée en utilisant la méthode de la consommation spécifique, conduit à l'expression du facteur de charge optimale identique à celui obtenu par la méthode du rendement voir formule (2.70)

$$n_{opt} = \frac{S_{c_{opt}}}{S_N} = \sqrt{\frac{P_v}{P_{CC}}}, \quad (2.73)$$

Et à l'expression du rendement maximale :

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2P_v}{\sqrt{\frac{P_v}{P_{CC}}} \cdot S_N \cdot \cos \theta + 2P_v}, \quad (2.74)$$

## **2.2.7.Établissement d'un modèle mathématique de la consommation d'électricité du broyeur cru**

### **2.2.7.1.Introduction**

On sait que l'industrie cimentière est fortement consommatrice en énergie électrique. En effet, la consommation spécifique d'électricité varie beaucoup d'une usine à l'autre et selon la disparité des performances des installations de production et d'électricité (entre 70 et 160 kWh/tonne de ciment) [8,13-14,20,40]. Taguchi énonce que tout produit dont la caractéristique de performance est différente de la valeur cible entraîne une perte de qualité [37]. Donc, la consommation d'électricité par lignes de production et par ateliers (concassage, broyage, transport et transfert de la matière et de l'électricité... etc.), qui n'est pas conforme aux normes d'exploitation et non liée à la production de la matière première, entraîne des pertes à vide considérables et par la suite une diminution des revenus [8,13-14,16-18,20,40]. Pour réduire ces pertes inutiles, on recourt aux différentes solutions possibles de l'amélioration des performances des installations de production existantes et choisir parmi elles la plus adéquate plutôt que de recourir à l'investissement car l'incidence économique est très lourde [16-22,40]. Mais, l'investissement pour un choix rationnel des installations de concassage, de broyage [17,21,23] et pour d'autres appareils de nature divers [23-29,40], est possible durant l'étape de la reconstruction des entreprises. Alors, pour le cas de la cimenterie de Ain-Touta qui est en phase d'exploitation planifiée, la recherche de l'optimisation du régime de fonctionnement du broyeur cru pour cette entreprise [21, 30-36], représente un facteur important d'économie d'énergie. Cette stratégie nous permet d'obtenir une qualité de ciment régulière et une production maximum avec une meilleure utilisation de l'énergie et une consommation de matériaux plus faible.

### **2.2.7.2.But et conditions de recherche**

Le but visé dans cette thèse est de rechercher les principaux facteurs qui influencent grandement le régime de fonctionnement du broyeur cru de la cimenterie de Ain-Touta et d'établir l'équation fonctionnelle du critère d'optimisation de la consommation d'électricité. C'est l'un des objectifs visés dans cette thèse.

### **2.2.7.3.Etablissement du modèle mathématique**

#### **A) Identification du problème**

On a examiné le régime de fonctionnement des broyeurs crus de la cimenterie de Ain-Touta et les changements survenus de l'écoulement de la matière première à broyer, on a constaté que la production des broyeurs subit des fluctuations dans le temps à cause de l'interruption de la charge momentanée et prolongée qui permet à l'installation de broyage de fonctionner avec une charge réduite donne des pertes d'énergie à vide relativement importantes. D'autre part les surcharges des broyeurs produisent des pertes d'énergie considérables qui croissent avec la charge. Cette interruption accroît la consommation spécifique d'électricité et entraîne une qualité inférieure du produit non désiré [8,16,18, 40]. Dans tous les cas, ces deux inconvénients entraînent un accroissement des dépenses superflues et accélèrent le vieillissement prématuré des installations de broyage [8,18-21,23].

D'ici d'écoule que la disparité des performances rencontrées des broyeurs est très importantes. Il y a donc un gisement important d'économie à réaliser.

Conscient de l'importance du problème et après discussion avec les spécialistes de l'entreprise de fabrication du ciment, le facteur des pertes d'énergie électrique apparaît comme un axe prioritaire de sa recherche. En se basant sur cette hypothèse pratique, la recherche du régime optimal de fonctionnement des broyeurs par différentes méthodes de recherche scientifique [14,21,30-37,40], permet à l'entreprise de recouvrir les investissements et de recevoir un gain appréciable sur toute la durée de vie de ces broyeurs. Donc cette technique peut être considérée comme une possibilité de recherche relative à l'économie d'énergie électrique pour cette entreprise.

## B) Choix des paramètres

Les paramètres les plus influant sur la consommation d'énergie électrique des broyeurs crus (Pt) [8,13,16-18,20-23,40] sont :

- $P_{v_b}$  : Consommation d'énergie électrique du broyeur au régime à vide, KWh/h.
- Bb : Charge des corps broyant, t ;
- Bu : Diminution de masse des corps broyant à cause de l'usure, t ;
- $D_b$  : Quantité de la matière première qui s'écoule à travers le broyeur, t ;
- $T_b$  : Temps de fonctionnement du broyeur, h ;

On écrit sous forme mathématique l'équation fonctionnelle des paramètres cités ci-dessus :

$$F[Pt, P_{v_b} (Bb,Bu), D_b, T_b ] = 0 \quad (2.75)$$

On fera les commentaires suivants sur le choix de ces paramètres :

Consommation d'énergie électrique indépendante de la charge du broyeur:

Après expertise sur le broyeur cru à boulet et sur les études bibliographiques, on a constaté que la plus grande partie de la consommation d'énergie électriques ( $P_{v_b}$ ) est indépendante de la quantité de la matière première à broyer ( $D_b$ ), Seulement 3-6% de l'énergie électrique disponible est utilisée pour le broyage des matières. Le reste se perd sous forme de chaleur, usure, vibration et bruit. En effet les facteurs d'exploitation dont elle dépende sont la charge des corps broyant (Bb) et la diminution de masse des corps broyant à cause de l'usure (Bu) [8,13,20,22-23,40]. Or, quelque soit l'accroissement de la vitesse de l'usure, la diminution de masse des corps broyant (Bu) est faible et varie peu avec la charge du broyeur ( $D_b$ ) et par conséquent la charge des corps broyant est relativement constante. Donc la consommation d'énergie ( $P_{v_b}$ ) au régime à vide du broyeur étudié est constante et inévitable.

$$P_{v_b} = Cte, \text{ KWh/h} \quad (2.76)$$



Consommation d'énergie croissant avec la charge du broyeur :

En se basant sur les relevées de l'énergie électrique consommée ( $P_{t_b}$ ) et de la quantité de la matière première ( $D_b$ ) qui s'écoule à travers le broyeur dans le temps ( $T_b$ ) et sur les études bibliographiques [8,13,20,22-23,40], on a constaté que l'énergie nécessaire pour le broyage de la matière première ( $P_{c_b}$ ) augmente rapidement avec la charge du broyeur . Peut être exprimé par l'équation fonctionnelle suivante :

$$F [ P_{c_b} , D_b , T_b ] = 0 \quad (2.77)$$

On a remplacé les paramètres suivants ( $D_b$  et  $T_b$ ) par la relation physique équivalente:

$$Q_b = D_b / T_b , \text{ t/h} , \quad (2.78)$$

L'équation (2.77) peut être remplacée par l'équation suivante

$$F [ P_{c_b} , Q_b ( D_b , T_b ) ] = 0 \quad (2.79)$$

## C) Recherche du modèle

Choix de la forme de la formule

On sait maintenant que l'énergie consommée du broyeur ( $P_{t_b}$ ) est une composante sommaire de l'énergie disponible utilisée pour le broyage de la matière première ( $P_{c_b}$ ) augmentée des pertes à vide ( $P_{v_b}$ ).

On écrit sous forme mathématique l'équation fonctionnelle des paramètres cités ci-dessus

$$F [ P_{t_b} , P_{v_b} (\text{Cte}) , P_{c_b} (Q_b) ] = 0 \quad (2.80)$$

Etant donnée que l'énergie utile ( $P_{c_b}$ ) augmente rapidement en fonction de la quantité de la matière à broyer dans le temps c'est à dire en fonction du débit ( $Q_b$ ) [ 8,13,20,22-23, 40] et pour rassembler ces facteurs en groupement significatif [37, 31-36], la forme de la formule proposée se montre la meilleure est :

$$P_{t_b} = P_{v_b} + R_b Q_b^{m_b} , \text{ KWh/h} \quad (2.81)$$

Où :

-  $P_{v_b}$ ,  $R_b$  et  $m_b$  : Sont des grandeurs constantes qui caractérisent la forme du modèle proposé relative à la consommation d'énergie électrique du broyeur cru. Nous avons déterminé ces paramètres par la formule de régression [31-37] à partir de l'énergie consommée et de la quantité de la matière à broyer dans le temps pratiquées sur le broyeur cru de la cimenterie de Ain-Touta. Dont les relevés de mesures sont donnés dans le tableau 2.1 :

b) Détermination des paramètres

Du tableau 2.1. des relevés des grandeurs mesurées, nous avons pris trois points d'abscisses ( $Q_b 1=144$ ), ( $Q_b 2 =152$ ) et ( $Q_b 3 = (Q_b 1. Q_b 2)^{1/2} = 147$  valeur approchée parmi les grandeurs mesurées ) et d'ordonnées, respectivement, ( $P_{t_b} 1= 2648$ ), ( $P_{t_b} 2 = 2783$ ), ( $P_{t_b} 3 = 2693$ ) et ( $Q_b 1$  et  $Q_b 2$  sont choisis arbitrairement) et nous obtenons :

$$P_{v_b} = P_{t_b} 1. P_{t_b} 2 - P_{t_b} 3^2 / (P_{t_b} 1 + P_{t_b} 2 - 2 P_{t_b} 3), \text{ KWh/h} \quad (2.82)$$

D'après la formule (2.82) et les résultats des mesures figurant dans le tableau 2.1 :

$$P_{v_b} = 2603, \text{ KWh/h}$$

Tableau 2.1 Grandeurs mesurées et résultats de calcul des paramètres r et m

$n_b$	Débit Horaire $Q_b i, t/h$	Energie consommée par Heure $P_{t_b} i, \text{ KWh/h}$	$X_i = \text{Log } Q_b i$	$X_i^2$	$Y_i = \text{Log} (P_{t_b} i - P_{v_b})$	$Y_i^2$	$X_i.Y_i$
1	144	2648	2.1583625	4.6585287	1.6532125	2.7331116	3.5682319
2	147	2693	2.1673173	4.6972643	1.9542425	3.8190637	4.2354636
3	151	2753	2.1789769	4.7479403	2.1760913	4.7353733	4.7416527
4	152	2783	2.1818436	4.7604415	2.2552725	5.0862540	4.9206519
5	154	2835	2.1875207	4.7852468	2.3654880	5.5955335	5.1745540
6	157	2899	2.1958996	4.4219751	2.4712917	6.1072827	5.4267085
			$\sum X_i = 13.069921$	$\sum X_i^2 = 28.471397$	$\sum Y_i = 12.875599$	$\sum Y_i^2 = 28.076619$	$\sum X_i.Y_i = 28.067263$

En utilisant la méthode d'alignement[33], nous pouvons vérifier, si la formule choisie (2.81) convient ou non

En alignant :

$$X_i = \text{Log } Q_b i \quad (2.83)$$

$$r_b = \text{Log } R_b \quad (2.84)$$

$$Y_i = \text{Log}(P_{t_b} i - P_{v_b}) \quad (2.85)$$

Après linéarisation l'équation (2.81) étant de la forme

$$Y = m_b X + r_b \quad (2.86)$$

Pour déterminer si l'augmentation de la variable X provoque un accroissement proportionnel de la variable Y de la relation (2.86), nous calculons la corrélation linéaire ( $g_b$ ), en utilisant la formule de Pearson [26] soit :

$$g_b = ((n_b \sum Xi.Yi - \sum Xi \sum Yi) / (\sqrt{n_b \sum Xi^2 - (\sum Xi)^2} \cdot \sqrt{n_b \sum Yi^2 - (\sum Yi)^2})), \quad (2.87)$$

D'après la formule de Pearson (2.87) et les résultats figurant dans le tableau 2.1 :

$$g_b = 0.989$$

Pour savoir la signification de ce coefficient ( $g_b$ ), calculons le nombre de degrés de liberté :

$$f_b = n_b - 2, \quad (2.88)$$

$$f_b = 6 - 2 = 4$$

Pour 4 degré de liberté, nous voyons sur la table IV [36], que la valeur du coefficient de corrélation 0.989 correspond bien à un seuil de signification inférieur à 1%, nous pouvons conclure qu'il existe réellement une corrélation.

Les coefficients  $r_b$  et  $m_b$  sont calculés du système d'équation formulé par la méthode des moindres carrés de la manière suivante :

$$\begin{aligned} n_b r_b + m_b \sum_1^n Xi &= \sum_1^n Yi & (2.89) \\ r_b \sum_1^n Xi + m_b \sum_1^n Xi^2 &= \sum_1^n Xi.Yi \end{aligned}$$

Après traitement :

$$P_{V_b} = 2603, \text{ KWh/h}$$

$$r_b = -45.156976$$

$$R_b = 10^r = 10^{-45.156976}$$

$$m_b = 21.715315$$

En exprimant X, Y et  $r_b$  par les variables initiales dans la relation (2.86), on obtient la relation cherchée entre  $Q_b$  et  $P_{t_b}$  :

$$P_{t_b} = 10^r Q_b^{m_b} + P_{v_b}, \quad \text{KWh/h} \quad (2.90)$$

$$P_{t_b} = 10^{-45.156976} Q_b^{21.71535} + 2603, \text{ KWh/h}$$

Etant donnée que les paramètres  $R_b$  et  $m_b$  sont connus, nous pouvons de nouveau prendre ( $P_{v_b}$ ) égal à la valeur moyenne, en utilisant l'égalité suivante :

$$P_{v_b} \text{ moy} = P_{v_b} i / n_b = \sum (P_{t_b} i - R_b Q_b i^m) / n_b, \quad \text{KWh/h}, \quad (2.91)$$

$$P_{v_b} \text{ moy} = \sum (P_{t_b} i - 10^{-45.156976} Q_b^{21.715315}) / n_b \quad \sum (P_{t_i} - 10^{-45.156976} Q_i^{21.715315}) / n_b$$

Tableau 2.2. Résultats de calcul du paramètre  $P_{v_b} \text{ moy}$

$n_b$	$P_{t_b} i$ , KWh/h	$R_b Q_b i^m =$ $10^{-45.156976} Q_b i^{21.715315}$	$P_{v_i} = P_{t_b} i - R_b Q_b i^m$ $P_{v_i} = P_{t_b} i -$ $10^{-45.156976} Q_b i^{21.715315}$
1	2648	51.59	2596.4
2	2693	80.7	2612.3
3	2753	144.6	2608.4
4	2783	166.9	2616.1
5	2835	221.7	2613.3
6	2899	337	2562
			$\sum P_{v_b} i = 15608.5$

D'après la formule (2.91) et les résultats figurant dans le tableau 2.2

$$P_{v_b} \text{ moy} = 2601, \text{ KWh/h}$$

Alors la relation (2.87) prend la forme suivante :

$$P_{t_b} = 10^r Q_b^{m_b} + P_{v_b} \text{ moy}, \quad \text{KWh/h} \quad (2.92)$$

$$P_{t_b} = 10^{-45.156976} Q_b^{21.71535} + 2601, \text{ KWh/h}$$

L'erreur type de l'équation trouvée, est calculée par la formule :

$$\sigma Pt = \sqrt{\sum (Pt_{b,i} - Pt_{b,cal})^2 / (n_b - 2)} , \quad (2.93)$$

Tableau 2.3. Résultat de calcul de l'erreur type

$n_b$	$Pt_{b,i}$ , KWh/h	$Pt_{b,ical} = 10^{-45.156976} Q_b^{21.715315} + 2601$ , KWh/h	$\Delta i^2 = (Pt_{b,ical} - Pt_{b,i})^2$
1	2648	2652.6	21.16
2	2693	2681.7	127.69
3	2753	2745.6	54.76
4	2783	2767.9	228.01
5	2835	2822.7	151.29
6	2899	2938	1521
			$\sum \Delta i^2 = 2103.91$

D'après la formule (2.93) et les résultats figurant dans le tableau 2.3 :

$$\sigma Pt = 23, \text{ KWh/h}$$

Définitivement le modèle de la consommation d'énergie électrique du broyeur cru prend la forme suivante :

$$Pt_b = 10^{r_b} Q_b^{m_b} + Pv_b \text{ moy} \pm \sigma Pt, \quad \text{KWh/h} \quad (2.94)$$

$$Pt_b = 10^{-45.156976} Q_b^{21.715315} + 2601 \pm 23, \quad \text{KWh/h}$$

En divisant membre à membre l'égalité (2.94) par le débit horaire ( $Q_b$ ), nous pouvons ressortir la caractéristique de l'énergie spécifique totale consommée par le broyeur cru :

$$Pt_{b,s} = 10^{r_b} Q_b^{(m_b-1)} + (Pv_b \text{ moy} \pm \sigma Pt) / Q_b, \quad \text{KWh/t} \quad (2.95)$$

$$Pt_{b,s} = 10^{-45.156976} Q_b^{20.715315} + (2601 \pm 23) / Q_b, \quad \text{KWh/t}$$

De l'équation (2.95), nous obtenons respectivement la composante d'énergie spécifique du régime en charge et celle du régime à vide :

$$Pcs = 10^{r_b} Q_b^{(m_b-1)} = 10^{-45.156976} Q_b^{20.715315}, \quad \text{KWh/t} \quad (2.96)$$

$$Pavs = (Pv_b \text{ moy} \pm \sigma Pt) / Q_b = (2601 \pm 23) / Q_b, \quad \text{KWh/t} \quad (2.97)$$

## 2.2.7.4. Recherche de l'optimum de la consommation spécifique d'énergie

### A) Solution analytique

Alors, le problème se réduit à trouver le minimum du critère d'optimisation de la consommation spécifique d'énergie ( $P_{t_b} s$ ) du modèle proposé (2.95), dépendant de la variable indépendante ( $Q_b$ ). La méthode de calcul différentiel donne des résultats utiles et rapides [31-36], peut être utilisée pour extraire de notre critère d'optimisation une autre équation qui nous donne la valeur optimale de notre variable ( $Q_b$ ).

Nous différencions donc, ( $P_{t_b} s$ ) par rapport à ( $Q_b$ ), nous obtenons :

$$Q_b \text{ opt} = [(P_{v_b} \text{ moy} \pm \sigma P_t) / (10^r (m_b - 1))]^{1/m_b}, \text{ t/h} \quad (2.98)$$

D'après la relation (2.98)

$$Q_b \text{ opt} = [(2601 \pm 23) / (10^{-45.156976} 20.715315)]^{1/21.715315} = 150 \text{ t/h}$$

En remplaçant la valeur de la charge optimal (2.98), dans l'équation (2.95), on obtient la consommation spécifique minimale :

$$\begin{aligned} P_{t_b} \text{ smin} &= 10^{-45.156976} 150^{20.715315} + (2601 \pm 23) / 150 \\ &= 0.835 + 17.34 = 18.175 \text{ KWh/t} \end{aligned}$$

De l'égalité suivante, on tire le gain réalisé :

$$E_b = P_{t_b} s(Q_b) - P_{t_b} \text{ smin}(Q_b \text{ opt}), \quad \text{KWh/t} \quad (2.99)$$

Le gain réalisé relative à l'énergie spécifique dépensée pour le broyage de la matière première est déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$E_b r = \% [P_{t_b} s(Q_b) - P_{t_b} \text{ smin}(Q_b \text{ opt})] / P_{t_b} s(Q_b \text{ opt}), \quad \% \quad (2.100)$$

Selon les résultats que nous avons obtenus, l'énergie spécifique dépensée pour le broyage de la matière première  $P_{cs} = 0.835$  KWh/t, représente les 4.59% de l'énergie spécifique totale  $P_{t_b, smin} = 18.175$  KWh/t. Tant disque, les 95.41% représente l'énergie spécifique consommée à vide  $P_{v_b, s} = 17.34$  KWh/t. D'ici d'écoule que les pertes à vide rencontrées en réalité sont très importantes. Il y a donc un gisement important d'économie à réaliser. Mais l'application des méthodes de recherche récentes, fondées sur des bases scientifiques, relatives à l'économie d'énergie sans recours aux investissements, sont les prioritaires. Pour rendre le fonctionnement du broyeur cru plus économique, on s'efforce de stabiliser la charge au voisinage de la charge optimale  $Q_b, opt = 150$  t/h. L'application du modèle proposé (2.95) donne les résultats de calcul du régime économique de fonctionnement du broyeur étudié voir tableau 2.5. Le gain réalisé en fonction de l'ajustement de la charge du broyeur en s'approchant respectivement de la charge inférieure  $Q_b, inf = 144$  t/h et de la charge supérieure  $Q_b, sup = 157$  t/h à la charge optimale  $Q_b, opt = 150$  t/h, est présenté dans le tableau 2.4 ci-contre :

Tableau2.5 résultats comparatifs entre les valeurs mesurées et ceux obtenues à l'aide du modèle proposé

Débit $Q_b$ , t/h	Energie spécifique consommée en charge [22] $P_{cs}$ , KWh/t	Energie spécifique consommée à vide [23] $P_{v_b, s}$ , KWh/t	Energie spécifique consommée totale [21] $P_{t_b, s}$ , KWh/t	Gain réalisé [25] $E_b$ , KWh/t	Gain réalisé [26] $E_b, r$ , %
$Q_b, opt = 150$	0.835	17.34	18.175		
$Q_b, inf = 144$	0.358	18.06	18.42	$E_b, inf = 0.245$	$E_b, rinf = 29.34\%$
$Q_b, sup = 157$	2.147	16.57	18.71	$E_b, sup = 0.535$	$E_b, rsup = 64.1\%$

Tableau2.5 résultats comparatifs entre les valeurs mesurées et ceux obtenues à l'aide du modèle proposé

n	Débit horaire mesurée in situ $Q_b$ , t/h	Energie consommée par heure mesurée in situ $P_{t_b}$ , KWh/h	Energie spécifique calculée à l'aide des valeurs mesurées $P_{t_b, s} = P_{t_b} / Q_b$ , KWh/t	Energie spécifique calculée à l'aide du modèle (2.95)
1	144	2648	18.39	18.42
2	147	2693	18.32	18.24
3	151	2753	18.23	18.18
4	152	2783	18.31	18.21
5	154	2835	18.41	18.33
6	157	2899	18.47	18.71

## B) Solution graphique:

Le graphique de l'énergie spécifique consommée, déterminée par l'équation (2.95) courbe A et à l'aide des mesures expérimentales figurantes dans le tableau 5 courbe B, est présenté figure 2.13.

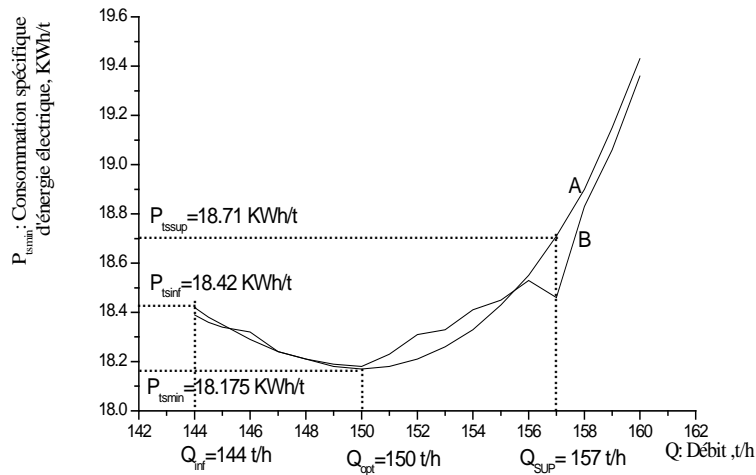


Figure 2.13. Variation de l'énergie spécifique consommée en fonction du débit de la matière première à broyer d'un broyeur cru de puissance 3000 KW et de capacité 145 à 175 t/h pour obtenir le minimum de pertes.

## C) Vérification de l'adéquation du modèle proposé

Par comparaison, la représentation graphique du modèle mathématique proposé (A) coïncide bien avec la courbe expérimentale (B) de l'installation industrielle du broyeur cru de la cimenterie de Ain touta, ce qui confirme qu'il est possible d'employer ce modèle, qui est adopté par le graphique figure 2.13 et plus clairement par les valeurs numériques qui se convergent beaucoup tableau 2.5

### 2.2.7.5. Conclusions

1) Le modèle que nous avons établi est comparé à l'expérience de l'entreprise envisagée et est considéré comme satisfaisant

2) Grâce à ce modèle on peut définir le régime économique d'exploitation du broyeur cru, en s'efforçant de stabiliser l'écoulement de la matière première au voisinage de la charge optimale (150 t/h), la consommation spécifique minimale d'énergie sera égale à 18.17 KWh/t

3) Toute divergence de la charge optimale dans les limites de 144 à 157 t/h entraîne une qualité inférieure du produit broyé qui nuise et interrompt les processus industriels postérieurs (usure rapide des éléments électriques et mécanique..) et par la suite un dommage financière à cause de l'accroissement de la consommation spécifique d'énergie de 0.25 à 0.54 KWh/t équivalent à une consommation de 36 à 85 KWh.



## **CHAPITRE.3**

### **3.Méthodes de l'optimisation de la consommation de l'énergie électrique dans les éléments du système d'alimentation**

Le problème d'optimisation consiste à déterminer la valeur optimale des variables de décision qui permet d'atteindre un objectif fixé d'avance, par exemple on cherche à minimiser les coûts d'une installation électrique ou bien d'un processus technologique en tenant compte de l'amortissement du prix d'achat des appareils électriques et des pertes par effet joule ou bien on cherche à minimiser d'autres facteurs qui ont un lien direct ou indirect avec la consommation d'énergie électrique par exemple l'optimisation de la tarification de l'énergie électrique ou bien on cherche à résoudre les problèmes de gestion et d'organisation de la consommation de l'énergie électrique par exemple la recherche du régime rationnel de fonctionnement des appareils électriques et des appareils technologiques dont le but de minimiser les pertes et d'augmenter le rendement sans dépasser les limites opératoires de sécurité de l'installation.

Dans notre recherche, nous avons pris comme critère d'optimisation le minimum de pertes d'énergie électrique aux condition de la consommation optimale. Sur la base de ce critère nous avons formulé plusieurs modèles originaux relatifs aux installations électriques par exemple le modèle des pertes d'énergie des transformateurs identiques marche en parallèle successivement dans les condition de recherche de la cimenterie de El-Ma-Labiod de plus nous avons formulé le modèle de la structure optimale de la compensation de l'énergie réactive à l'intention de la diminution des pertes actives entres différents niveaux de tension et différents moyen de compensation et d'autres modèles de la consommation de l'énergie électrique des installations technologiques de concassage et de broyage pour le but d'organiser la consommation et de diminuer les pertes par différentes méthodes de recherche théorique et expérimentale dans les conditions de recherche de la cimenterie de Ain-Touta.

Selon la fonction économique, qui traduit la façon dont le critère d'optimisation dépend des paramètres qui influent sur sa valeur, on choisi la méthodes de recherche du modèle.

#### **3.1. Méthodes de recherches des modèles**

Pour atteindre ce but, il est nécessaire de résoudre les taches scientifique suivantes :

- Analyse et sélection des facteurs selon le degré de leur influence sur les pertes d'énergie électrique
- Etablissement des caractéristiques par voie de recherche analytique ou expérimentale. Pour cela, on a recours aux modes de recherches suivants :

### 3.1.1. Recherches Analytique

On a recours à la méthode de simulation physique, basée sur la théorie de l'analyse dimensionnelle

#### 3.1.1.1. Méthode $\Pi$ théorème

En utilisant cette théorie, on étudie la ressemblance des phénomènes physiques ainsi les propriétés du phénomène [16,70-72]. Cette théorie a été élaborée par les savants Buckingham et Federman, et formulée de la manière suivante :

Chaque équation complète du procédé physique peut être présentée sous la forme d'une équation critérielle de  $(m-k)$  critères.

Où :

$m_p$  : Représente le nombre des paramètres qui influent sur le phénomène étudié ;

$k_p$  : Représente le nombre des unités de mesures principales

L'équation de ce type peut être résolue par rapport à n'importe quel critère et elle peut être présentée sous la forme de l'équation critérielle :

$$\Pi_i = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n) \quad (3.1)$$

Le problème du choix de l'équation du procédé est résolu d'après l'ordre suivant :

- 1) On cherche à l'aide de n'importe quelle méthode les paramètres qui influent sur le procédé
- 2) On suppose que l'équation fonctionnelle de ce procédé est complète et homogène

$$X_1 = f(X_2, X_3, X_4, \dots, X_n) \quad (3.2)$$

Où :

$X_1, X_2, \dots, X_n$  : Respectivement les paramètres de perfectionnement

- 3) On choisit le système des unités de mesure et leurs paramètres indépendants
- 4) On compose la matrice des dimensions des paramètres indépendants
- 5) On choisit la forme des critères
- 6) On détermine le coefficient de proportionnalité entre les critères à l'aide de l'expérience

### **3.1.2. Recherches expérimentales**

On a recours à la méthode passive, basée sur l'analyse de fonctionnement normal des installations électriques dans l'industrie

#### **3.1.2.1. Méthode de perfectionnement de l'objet recherche**

a) Méthode de l'expérience active : dans cette méthode de recherche on peut fixer arbitrairement des valeurs relatives aux facteurs et on les conserve durant l'expérience à un niveau constant soit à l'échelle de laboratoire ou à l'échelle de industrielle

b) Méthode de l'expérience passive : dans cette méthode l'expérimentateur ne planifie pas l'expérience, mais il s'occupe uniquement de l'enregistrement du processus et par la suite il essayera d'établir les relations quantitatives entre les paramètres jugés utiles et ceux de sorties. Dans cette méthode les résultats sont plus fidèles et reflètent la réalité de plus on peut interpréter les résultats directement à l'échelle de production comparatives à ceux obtenus au laboratoire qui peut atteindre de 30 à 40% d'erreur.

#### **3.1.2.1. Modèles empiriques :**

a) Méthodes de comparaison des courbes :

Le processus du choix d'une formule empirique pour une relation fonctionnelle soit disant de la consommation d'énergie électrique d'une installation est de la forme suivante  $f(X) = 0$  est établit expérimentalement se divise en deux parties [23,30-31,36-37,73-74] .

On choisit d'abord la forme de la formule et ensuite on détermine les valeurs numériques des paramètres pour lesquels l'approximation de la fonction donnée se montre la meilleure. S'il n'existe pas de considérations théoriques pour le choix de la forme de la formule , on prend habituellement une relation fonctionnelle parmi les plus simples , en comparant leurs courbes avec celle de la fonction donnée et ensuite après avoir choisi la formule et avant de déterminer la valeur des paramètres, de vérifier la possibilité d'emploi de cette formule, par la méthode d'alignement.

b) Détermination des paramètres :

La méthode la plus précise pour la détermination des paramètres est la méthode des moindres carrés. On peut cependant , dans la majorité des cas, employer avec succès des méthodes plus simples, en particulier la méthode des moyennes. Si la formule obtenue par cette méthode se montre insuffisamment précise, on peut encore, pour sa mise au point ultérieure, utiliser la méthode des moindres carrés, la connaissance approchée des valeurs des paramètres permettant alors de réduire le volume des calculs. Dans l'examen des courbes , il convient d'avoir toujours présent à l'esprit que, pour l'établissement des formules empiriques, il n'est utilisé que la partie de la courbe correspondant à un certain intervalle de variation de la variable indépendante.

Parmi les formes des formules empiriques les plus utilisées on distingue :

$$\begin{aligned} 1) Y &= aX^b & 2) Y &= ae^{bX} \\ 3) Y &= aX^b + C & 4) Y &= ae^{bX} + C \\ 5) Y &= aX^2 + bX + C & 6) Y^2 &= aX^2 + bX + C & (3.3) \\ 7) Y &= ae^{bX+CX^2} & 8) Y &= \frac{1}{aX^2 + bX + C} \\ 9) Y &= \frac{X}{aX^2 + bX + C} & 10) Y &= aX^b e^{cX} \\ 11) Y &= ae^{bX} + Ce^{dX} \end{aligned}$$

### 3.2. Méthodes d'optimisation

Suivant le caractère des modèles mathématiques considérés, on adopte différentes méthodes mathématiques d'optimisation. Beaucoup d'entre elles se réduisent à trouver le minimum ou le maximum de la fonction du but rechercher .

En procédant au choix de la méthode d'optimisation , on doit prendre en considération les difficultés de calcul qui peuvent survenir :

- Volume des calculs ;
- Complexité de la méthode elle-même ;
- Dimension du problème, etc.

Il est utile de faire dans la mesure du possible des évaluations préliminaires sur la position de l'optimum du problème quel qu'il soit. Pour cela, il est nécessaire d'examiner les liaisons initiales et les relations fondamentales entre les variables. Pour réduire les dimensions du problème, on utilise souvent le procédé d'explicitation des variables les plus importantes.

Les méthodes d'optimisation qui sont le plus largement employées en technologie sont ainsi :

- 1) Méthodes analytiques (méthode de seuil, méthode aux dérivées partielles) ;
- 2) Méthodes graphiques (méthode de seuil) ;
- 3) Méthodes de programmation mathématique ;
- 4) Méthode du gradient ;
- 5) Méthodes automatiques avec modèle à autoréglage ;

### 6) Méthodes statistiques (méthode de corrélation)

De ce qui suit, on définit ainsi le problème d'optimisation dont la forme générique suivante:

Les équations d'inégalités représentent sous forme mathématique les limites acceptables pour les variables considérées. On peut classer les équations d'inégalité en différentes catégories :

a). les limites d'opérations des unités : celles-ci peuvent être obtenues dans la spécification des équipements. Pour les équipements existants, les limites d'opérations peuvent être des valeurs contractuelles qui délimitent la responsabilité du fabricant de l'équipement. Ces limites sont également fixées au moment de la réception de l'installation

b). les contraintes environnementales pourront représenter soit les conditions actuelles soit les conditions futures que l'on désire voir de l'installation en service

c). les limites technologiques : lors d'un calcul de conception d'une nouvelle installation ou de la rénovation d'une installation existante, on fixe les limites de fonctionnement des nouveaux équipements (charge, température, etc.) afin qu'elles représentent les caractéristiques des équipements que l'on peut raisonnablement trouver sur le marché. Ces contraintes représenteront les limites des matériaux ou des techniques de construction.

d). les limites numériques : lorsque le modèle utilise des corrélations pour modéliser le comportement des équipements ou pour calculer la fonction objectif, il est nécessaire d'incorporer les limites de validité de ces corrélations dans le calcul d'optimisation afin de s'assurer de la pertinence des solutions obtenues.

Les limites numériques représentent également les limites de validité des modèles utilisés, que ce soit les modèles des unités ou même des contraintes concernant la configuration du système. On introduira par exemple des contraintes d'inégalité interdisant l'ouverture ou la fermeture d'une partie de l'installation

Selon des causes multiples soit disant techniques, technologiques ou organisationnelles, le régime de fonctionnement des installations électriques ou non se diverge de l'optimum et entraîne des pertes d'énergie non productifs. Dans ce cas là , la recherche du régime rationnel de fonctionnement des installations est nécessaire. Parmi les méthodes d'optimisation, l'étude du seuil permet d'obtenir une réponse rapide c'est la raison pour laquelle, on passe à décrire en détaille cette méthode [34-35] .

## 3.2.1.Méthode de Seuil

### a) Objectif

L'outil "Seuil" a pour but de définir :

- Soit les conditions de validité de différentes solutions en compétition,
- Soit leur seuil de rentabilité temporel ou économique.

## **b) Désignations similaires**

- Analyse du point mort
- Seuil de rentabilité
- Breack-even-point (en anglais)

## **c) Origine**

Très utilisé en gestion financière, L'outil Seuil trouve son origine dans l'étude des fonction appelée analyse en mathématiques

## **d) Domaines et contraintes d'utilisation**

En gestion de production l'outil Seuil peut être utilisé pour :

- Sélectionner un moyen de production ,
- Choisir entre plusieurs gammes possibles,
- Déterminer un retour sur investissement ,
- Déterminer l'impact d'un nouvel équipement sur la rentabilité d'une unité de production , etc.

Le traitement se fait graphiquement ou analytiquement . Dans le cas d'un traitement graphique , il est conseillé de limiter le nombre de solutions à trois ou quatre.

## **e) Méthodologie**

- 1) On collecte les données relatives au problème posé
- 2) On établit, la fonction économique
- 3) On cherche les points de Seuil critique
- 4) On Interprète les résultats

## **3.3.Algorithme d'optimisation**

### **3.3.1.Méthode Black Box**

La méthode Black box consiste à considérer le modèle et la méthode d'optimisation comme deux entités indépendantes Figure 3.1. La méthode d'optimisation envoie au modèle un jeu de valeur pour les variables de décision et reçoit en retour la valeur des fonctions objectifs et des contraintes d'inégalité. Il est donc supposé que le modèle comprend une procédure de résolution robuste qui sera à même de calculer la fonction objectif pour n'importe quelles valeurs des variables de décision.

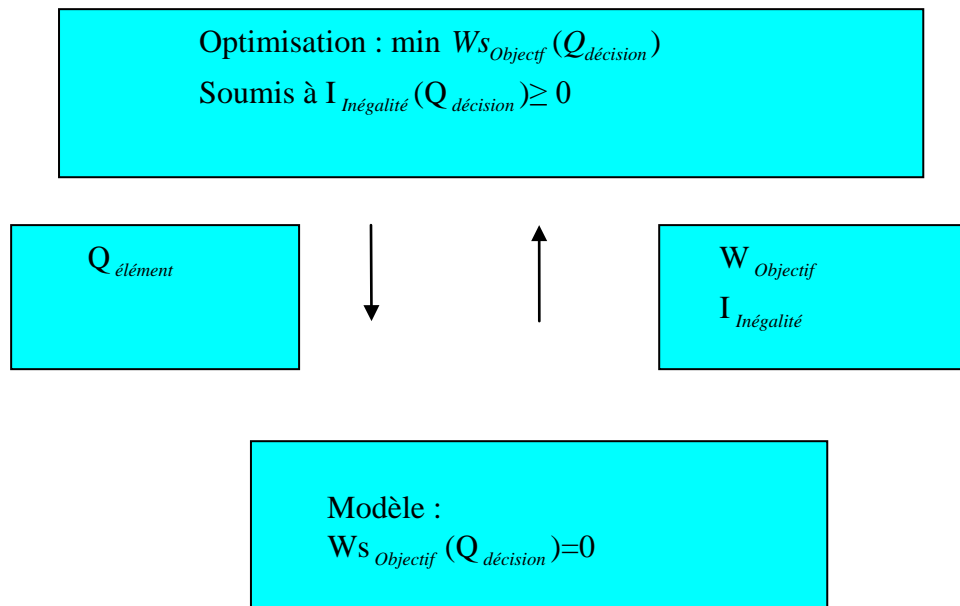


Figure 3.1. Algorithme d'optimisation méthode et modèle sont indépendants

L'approche black box permet l'utilisation de pratiquement tous les types d'algorithmes d'optimisation. Elle convient à la fois aux méthodes directes (sans calcul de dérivées), aux méthodes indirectes avec calcul des dérivées et aux méthodes même des approches graphiques. La méthode devient plus lourde d'utilisation lorsque la méthode d'optimisation fera appel au calcul des dérivées. Cette méthode repose sur l'hypothèse que le modèle est uni modal, c'est à dire qu'il n'existe qu'une seule valeur de la fonction objectif pour un jeu de variable de décision

Le principal avantage de cette méthode est sa simplicité et sa flexibilité. Elle repose principalement sur la qualité du modèle. Elle permet également de développer un modèle pour lequel on aura développé une méthode de résolution efficace et fiable et robuste

### 3.3.2. L'approche simultanée

Dans l'approche simultanée, le problème d'optimisation et le modèle sont résolus simultanément. Cela suppose l'utilisation d'algorithmes d'optimisation non linéaires et contraint qui utilisent la plupart du temps des méthodes indirectes basée sur la valeur des dérivées. Dans l'approche simultanée, le modèle n'a pas la responsabilité de résoudre le modèle, Il calcule en fonction des variables d'état, la valeur des équations de modélisation et de spécification et c'est l'algorithmes d'optimisation qui se chargent de calculer la valeur de toutes les variables d'état afin de satisfaire les équations de modélisation, les équations de spécifications et de vérifier les contraintes d'inégalité et de minimiser la fonction objectif.

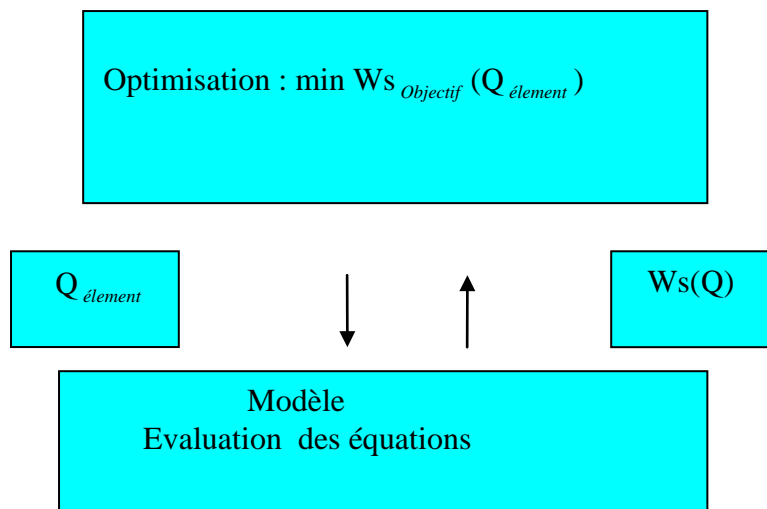


Figure 3.2. Algorithmes d'optimisation modèle et méthode résolus simultanément

Dans le cas d'une approche simultanée, les algorithmes d'optimisation seront des algorithmes non linéaires contraints. Qui doivent être à même de traiter les systèmes de grande taille. Pour ces méthodes on distinguera les méthodes faisables et infaisables, selon qu'elle chercheront tout d'abord à résoudre le système d'équation d'égalités puis suivront ensuite un chemin d'optimisation pour atteindre l'optimum ou qu'elles chercheront à atteindre simultanément la vérification des contraintes d'égalité et les conditions d'optimalité.

L'avantage des méthodes simultanées est leur grande souplesse au niveau de la définition du problème : le modèle définit une liste d'équations à résoudre et l'algorithme d'optimisation est en charge de la résolution. Elle est donc particulièrement bien adaptée lorsque l'on dispose d'un algorithme de résolution performant. Ceci sera d'autant plus vrai que le modèle sera à même de calculer les dérivées de manière analytique. Ce type d'approche sera donc particulièrement indiqué si on utilise des logiciels développés pour les calculs d'optimisation et de modélisation l'utilisation des techniques avancées d'optimisation. Le temps de calcul des méthodes simultanées est considérablement réduit par rapport à celui d'une méthode back box. Cette approche sera donc particulièrement adaptée pour les calculs d'optimisation en ligne pour lesquels la solution précédente sera utilisée comme point de départ du nouveau calcul.

Il est possible d'utiliser aisément des solutions de continuation afin d'aider à la résolution des problèmes fortement non linéaire. Etant basés sur des méthodes basées sur les dérivées, les approches simultanées présentent l'avantage de toute l'information générée au point solution, à savoir les multiplicateurs de Lagrange, la sensibilité des paramètres.



Cette remarque concerne également la formulation du problème, l'analyse de la matrice d'incidence permettant de vérifier que le problème est bien posé. Les approches simultanées permettent de changer aisément de formulation de problème, sans avoir à intervenir sur la définition du modèles et sans avoir à choisir la liste des variables dépendantes.

### **3.4.La procédure pour simuler et optimiser les systèmes énergétiques**

La procédure Analyser, Générer, Evaluer représente une méthodologie générique en trois étapes qui sera appliquée lors de la réalisation de calculs de modélisation et d'optimisation. La première étape, Analyser, consiste à poser le problème. C'est-à-dire, tout d'abord choisir et assembler les modules puis ensuite analyser les degrés de liberté du système pour déterminer les équations de spécification et les équations de consigne ou les variables de commande. La seconde étape, Générer, correspond à la résolution du système d'équations. Cela suppose d'initialiser les variables et de résoudre le système d'équations non linéaires par une méthode adéquate. La troisième étape, Evaluer, consiste à transformer un résultat numérique en solution. Il aura pour objectif de vérifier la consistances des résultats numériques fournis par le modèle et de confronter ces valeurs numériques à la réalité. Une fois le modèle approuvé, il pourra être utilisé pour appuyer les décisions des spécialistes. L'étape Evaluer sera également utilisée dans le cas où la solution n'a pas été trouvée afin d'en déterminer la cause de l'échec. En effet la cause peut être attribuée soit à l'algorithme de résolution qui n'a pas réussi à trouver la solution, soit l'ensemble des spécifications qui est inconsistant et qui correspond donc à un système non faisable.

## **CHAPITRE 4**

### **4. Mesures techniques technologiques et organisationnelles de la régularisation de la consommation de l'énergie électrique**

#### **4.1. Classification des mesures d'organisation, de planification et de régularisation de la consommation de l'énergie électrique**

##### **4.1.1. Les sources d'économie d'énergie**

La transformation d'installations existantes doit avoir pour objectif de se rapprocher de la performance des meilleures technologies disponibles, mais il n'est pas toujours économiquement rentable d'effectuer toutes les transformations permettant d'atteindre réellement cette cible [58].

De nombreuses solutions peuvent réduire de façon significative les consommations calorifiques et électriques soi disant pour le cas des cimenteries. Chaque solution, envisagée après une étude généralement menée par le cimentier, avec le concours éventuel d'experts ou ingénieurs conseils, est à valider sur le plan technico-économique avec les ingénieurs et constructeurs spécialisés sur l'ensemble des aspects énergétiques, production, qualité et impact sur l'environnement.

En effet, les modifications d'installations existantes ne se bornent pas seulement à l'aspect énergétique ; il s'agit en général de projets à buts multiples intégrant l'évolution de la production, le respect de l'environnement, la recherche des qualités « ciment » adaptées aux besoins du marché, la performance de chaque équipement (énergétique, fiabilité, maintenance, etc.).

##### **4.1.2. Potentiel de gains énergétiques et rentabilité**

L'étude de rénovation complète d'une cimenterie peut conduire à la construction d'une nouvelle ligne de production, ou à l'amélioration de lignes existantes. Il en est de même l'ensemble d'un atelier seul. Dans cette étude nous avons pris en compte des nécessités techniques, technologiques, organisationnelles, sécurité, fiabilité, performances d'une façon globale, l'aspect énergétique n'est qu'un aspect de l'ensemble des buts des projets de rénovation, et chaque cimenterie ou chaque atelier constitue un cas particulier d'étude. Finalement, si les contraintes économiques obligent l'obtention d'une rentabilité suffisante, les aspects sécurité et respect de l'environnement ne peuvent être laissés de côté.

Plusieurs voies doivent alors être étudiés pour rechercher une rentabilité raisonnable et minimiser les risques financiers dus à l'investissement. Par ailleurs, les temps d'arrêt de production, lors d'une rénovation, doivent être pris en compte dans l'estimation des solutions disponibles. Autant que possible, les travaux doivent être réalisés avant l'arrêt de l'atelier concerné.

### 4.1.3.Étapes de réalisation du diagnostic

La première étape du diagnostic énergétique d'une cimenterie est de situer sa performance énergétique par rapport aux unités modernes, ce qui permet d'évaluer approximativement les marges de gain envisageables. Le diagnostic est donc amorcé par une revue des données caractéristiques du fonctionnement de l'usine : tonnage des ventes annuelles, factures d'électricité, factures de combustibles.

La deuxième étape est d'identifier le taux de fiabilité des équipements, puisqu'une disponibilité faible des équipements (arrêts fréquents, etc.) est source de dépenses énergétiques importantes, il faut rappeler que l'objectif de fiabilité est 95% [13].

Ce problème est rencontré fréquemment dans les pays en développement et constitue un axe important du diagnostic, d'autant plus qu'une part importante de l'amélioration de la fiabilité peut ne pas nécessiter d'investissements importants :

Il est nécessaire d'implanter des méthodes rigoureuses de suivi des équipements, d'analyser les sources réelles d'arrêt (des défauts mécaniques ou électriques peuvent cacher une origine procédée) et de trouver les parades nécessaires. Les méthodes d'entretien curatif puis préventif laissent progressivement la place à l'entretien conditionnel. Ce type d'entretien est à privilégier, puisqu'il cherche à suivre au mieux le comportement des équipements afin de déterminer à l'avance le moment de l'intervention [58]

Une comptabilisation, par atelier et par équipement, des consommations calorifiques et électriques est nécessaire pour disposer d'un bilan énergétique suffisamment précis pour permettre d'identifier les sources principales d'amélioration de la performance énergétique.

Pour un atelier de broyage comprenant plusieurs broyeurs, il est important de connaître les puissances spécifiques de chacun d'eux individuellement, puisqu'il n'est pas rare qu'un seul des broyeurs soit la cause d'une mauvaise performance globale de l'atelier.

Une fois que les consommations énergétiques spécifiques sont bien identifiées par atelier et par équipement, il est souhaitable d'examiner les différentes possibilités d'amélioration énergétique en intégrant obligatoirement les exigences de qualité visée pour le produit, mais aussi les nécessités de respect de l'environnement, en fonction des normes applicables ou à venir. Ces études doivent être examinées cas par cas avec des spécialistes qui peuvent faciliter la définition des axes de progrès à examiner. Il est aisé de définir les coûts d'investissement d'une nouvelle unité de production. Il est cependant plus difficile d'évaluer l'évolution des coûts énergétiques, qui sont liés à des données politiques et conjoncturelles. Or, ils représentent une part importante du prix de production. Toute étude de modernisation devra donc être établie en mesurant la sensibilité de la rentabilité de l'investissement aux coûts des énergies consommées

$$S_r = \frac{C_I}{C_{EC}}, DA/KWh \quad (4.1)$$

Où :

$C_I$  et  $C_{EC}$  : Respectivement représentent les coûts d'investissement et des énergies consommées

## **4.2. Révélation des consommateurs régulateurs de l'énergie consommée dans les unités de ciments**

Nous savons que la consommation électrique dans les unités de ciments,[8-14,16-23] varie entre 70,7 et 159,5 kWh/tonne de ciment. Elle est liée principalement au broyage des matières premières et du clinker. L'intérêt énergétique de certains procédés de broyage par rapport à d'autres. vient de multiples raisons telles que :

- Extrême diversité des produits à broyer : en particulier pour le ciment, la finesse recherchée (la consommation électrique en dépend) est fonction de la qualité du ciment recherchée, et de la qualité du clinker broyé;

- Il est à noter que les ventilateurs sont également de gros consommateurs d'énergie électrique [15.18.58,79]. À titre d'exemple, la puissance du ventilateur principal installé sur un broyeur vertical est du même ordre de grandeur que celle du moteur du broyeur.

- La consommation électrique dépend aussi de la qualité de l'ingénierie mise en oeuvre pour la conception de la ligne de production (usine en «ligne» avec un nombre limité de transporteurs, transport par convoyeurs plutôt que pneumatique, etc.).

- Le manque de fiabilité des équipements est un facteur important de surconsommation électrique, en fonction de la fréquence et de la durée des arrêts et redémarrages (les ventilateurs ne sont pas arrêtés lors d'arrêts momentanés, par exemple).

- La production d'électricité étant souvent réalisée par des centrales thermiques brûlant des combustibles minéraux (charbon), ou pétroliers (fuel-oil, gaz), toute économie dans la consommation d'électricité permet de réduire la facture énergétique, mais aussi les émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité.

## **4.3. Application de la compensation de l'énergie réactive à l'intention de la diminution des pertes**

### **4.3.1. Compensation de la puissance réactive**

Dans toute installation électrique alimentée en courant alternatif, la puissance consommée se décompose en:

- Puissance active se transforme en puissance utile et en chaleur,
- Puissance réactive n'accomplit aucun travail mais sert pour créer le champ magnétique dans les moteurs et les transformateurs.

La consommation excessive, pour une centrale industrielle de l'énergie réactive, entraîne des dépenses élevées. Pour réduire ces dernières, il faut agir sur le facteur de puissance de l'installation. C'est pourquoi le  $\cos\phi$ , caractérisant la puissance installée, représente l'indice énergétique principal du réseau électrique .

En Algérie, le facteur de puissance est considéré normal s'il atteint 89.4%; des que le facteur de puissance soit faible dans une entreprise consommant de l'énergie électrique, l'entreprise paye une amende et lorsque ce facteur est élevé, elle reçoit une prime.

Donc, l'amélioration du  $\cos\varphi$  est une tâche extrêmement importante pour l'économie. Le consommateur devrait donc soit payer la part de la puissance réactive correspondante, soit prévoir une installation de compensation de la puissance réactive.

En principe, il est possible d'agir sur le facteur de puissance en intervenant sur la puissance active, en pratique on fait varier la puissance réactive soit en la diminuant, soit en l'augmentant, ce réglage s'appelle évidemment la compensation,[69]

La puissance réactive n'est nettement définie qu'en sinusoïdale, elle vaut

$$Q = UI\sin\varphi \quad (4.2)$$

$\varphi$  : étant le déphasage entre le courant (I) et la tension (U).

Le cas du circuit R, L, C permet de comprendre la signification physique de Q.

Pour ce circuit.

$$Q = UI\sin\varphi = ZI \frac{X}{Z} = I^2 X = L\omega I^2 - \frac{I^2}{C\omega} = U_L I - U_C I \quad (4.3)$$

La puissance réactive Q traduit l'importance de l'échange d'énergie entre la source et l'inductance ou la capacité, échange à bilan nul puisqu'on rapporte sur R l'ensemble des pertes. On dit que les inductances absorbent de la puissance et que les capacités en créent.

$$Q_s = U_L I - U_C I \quad (4.4)$$

Si  $U_L = U_C$ , alors  $Q_s = 0$ . Malgré, le courant débité n'est pas nul et, bien que l'alternateur soit raccordée au réseau, il n'y débite aucune puissance réactive. On dit que les charges d'énergie réactives s'équilibrent à chaque instant. Il s'ensuit que l'alternateur débite une puissance active dans le réseau. Mais si  $U_L > U_C$ , l'alternateur fournit de la puissance réactive en plus de la puissance active au réseau, dans le cas contraire, l'alternateur fournit de la puissance active au réseau en plus il reçoit de la puissance réactive.

Donc, le sens physique de cette puissance réactive c'est une énergie accumulée dans les éléments non dissipatifs tels que les selfs et les condensateurs. Cette énergie est liée aux champs électriques et magnétiques. En régime variable, elle est emmagasinée par les selfs puis basculée vers les capacités.

### 4.3.2.Méthodes de compensation

Le fonctionnement du réseau dans de bonnes conditions de la qualité, de sécurité et d'économie implique une maîtrise de l'évolution de son état électrique.

Le maintien d'une tension correcte nécessite de la part du dispatcher, des ajustements de la production d'énergie réactive par un dialogue avec les centrales. Dans ces conditions, la coordination des divers moyens de réglage est délicate. Il en résulte des variations de tension importantes entre heures creuses et heures pleines.

Ces variations peuvent être gênantes et il peut dans certains cas en résulter un risque d'auto dégradation du plan de tension qui peut conduire à un effondrement partiel ou total du réseau.

Sans disposition particulière, la puissance réactive consommée par les charges et le réseau provient essentiellement des alternateurs. On sait que le transit de cette puissance à travers les éléments du réseau produit non seulement des chutes de tension mais aussi des pertes actives par effets joule.

$$\Delta P = RI^2 = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (4.5)$$

On peut réduire ces perturbations de tension ainsi que les réactions dues aux charges asymétriques et aux harmoniques, en évitant le transport de la puissance réactive et la produire autant que possible là où elle est consommée et cela est possible en installant des dispositifs appelés les compensateurs réactives.

La compensation de la puissance réactive a pour tâche:

- De réduire les fluctuations de tension et les phénomènes qui fatiguent le réseau
- D'améliorer le facteur de puissance  $\cos\varphi$ ,
- D'équilibrer les charges asymétriques.

On distingue les sources principales et les sources secondaires.

a) Les sources principales sont destinées pour la production de la puissance active et la puissance réactive, ce sont les générateurs des centrales électriques qui produisent ces puissances.

b) Les sources secondaires sont des installations électriques destinées pour la compensation du surplus ou des déficit de la puissance réactive dans les réseaux électriques et pour des différents réglages dans ces régimes de fonctionnement. Leur puissance installée et leur emplacement sont en relation directe avec des critères techniques et technico-économique.

Les installations électriques de compensation sont installées dans des sous stations directement ou sous formes de consommateur, [68-69]. Parmi les moyens de compensations réactives on a:

- Compensateur synchrone
- Compensateur statique à thyristors.
- Inductance
- Batterie de condensateur

### 4.3.2.1. Compensateur synchrone

Il peut être assimilé à un moteur synchrone fonctionnant à vide, c'est à dire que son arbre n'est pas soumis à aucun couple résistant, qui serait peut-être considéré comme charge. Le stator est branché au réseau à un courant triphasé, sur le rotor est enroulé une bobine d'excitation. On peut donc considéré que le compensateur synchrone consomme une très faible quantité de puissance active égale aux pertes par échauffements dans ces enroulements du stator et par frottement. Nous devons limiter la puissance active et augmenter un peu la puissance réactive de telle façon que le courant  $I_{CS}$  passant par les enroulements ne dépasse pas la valeur maximale du stator. le courant débité  $I_{CS}$  se détermine à partir de cette formule.

$$I_{CS} = \frac{V_{CS} - V_r}{X_s} \quad (4.6)$$

Lorsqu'on synchronise le compensateur, la tension induite correspondant à chacune des phases  $V_{CS}$  est égale et en phase avec la tension du réseau  $V_r$ . Il n'existe donc aucune différence de potentiel  $V_{CS} - V_r$  aux bornes de la réactance synchrone  $X_s$ . Par conséquent, le courant  $I_{CS}$  est nul et, bien que le compensateur soit raccordé au réseau, il n'y débite aucune puissance. On dit qu'il « flotte » sur le réseau. Si l'on augmente le courant d'excitation  $I_{EX}$ , la tension  $V_{CS}$  augmente et un courant  $I_{CS}$  s'établit dans le circuit déphasé de  $90^\circ$  en arrière de la tension du réseau  $V_r$  de sorte que le compensateur « voit » le réseau comme une inductance. Donc, lorsque l'on surexcite un compensateur, il fournit au réseau une puissance réactive d'autant plus grande que le courant d'excitation est plus élevé. Enfin si l'on diminue le courant d'excitation de façon que  $V_{CS}$  devienne plus petite que  $V_r$  et un courant s'établit dans le circuit déphasé de  $90^\circ$  cette fois ci en avant de la tension du réseau  $V_r$  de sorte que le compensateur voit le réseau comme une capacitance. Donc, lorsque l'on sous excité un compensateur il reçoit de la puissance réactive. Cette puissance réactive produit une partie du champ magnétique nécessaire à la machine, l'autre partie étant fournie par le courant d'excitation  $I_{EX}$ .

Par conséquent la puissance aux bornes du compensateur synchrone est donnée par:

$$S_{CS} = \sqrt{3}I_{CS}V_{CS} = Q_{CS} \quad (4.7)$$

Pour pouvoir coupler en parallèle un compensateur avec le réseau , il faut que les conditions suivantes soient remplies :

- 1) La tension du compensateur doit être égale à celle du réseau ;
- 2) La fréquence du compensateur doit être la même que celle du réseau
- 3) La tension du compensateur doit être en phase avec celle du réseau

Les paramètres qui déterminent la puissance active et réactive qu'il débite dans ces circonstances sont ainsi :

La tension et la fréquence appliquées aux bornes du compensateur étant fixes, on ne peut plus faire varier que deux paramètres :

- a) La puissance réactive débité par l'alternateur en agissant sur le courant d'excitation
- b) La puissance active débité par l'alternateur en agissant sur le couple mécanique exercé par la turbine

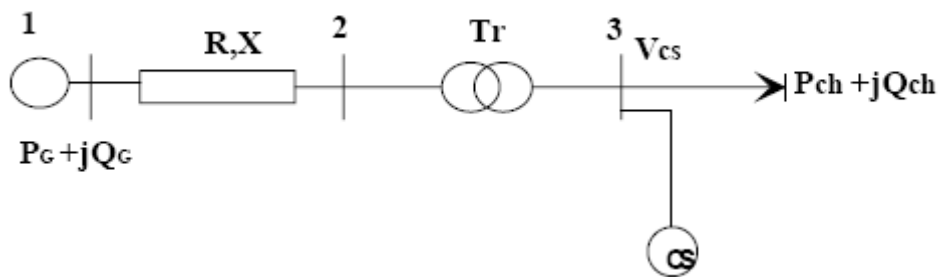


Figure 4.1: Schéma d'alimentation d'un réseau électrique avec un compensateur synchrone

Les compensateurs synchrones sont placés près des grands centres de distribution, ils jouent le rôle de capacités variables. Dans les réseaux bouclés ils permettent de régler les puissances transmises par les diverses lignes d'alimentation. Aux heures de fortes charges ils créent beaucoup de réactive pour diminuer les chutes de tension. Ils peuvent être nécessaires à certains moments de leur faire absorber de la puissance réactive, par exemple pour compenser l'élévation de tension créée par une longue ligne ( HT ) à vide. Leur puissance est de ( 20 à 60 ) MVAR en fourniture et de ( 10 à 30 ) MVAR en absorption, donc la puissance réactive qu'un compensateur peut absorber est de l'ordre de la moitié de sa puissance nominale.



### 4.3.2.2. Batterie de condensateur

Le procédé le plus courant permettant d'améliorer le facteur de puissance est l'installation des batteries de condensateur statique. Quand ils sont branchés au réseau ils deviennent un générateur local d'énergie réactive. Les condensateurs peuvent être couplés en étoile ou en triangle.

La capacité des batteries est déterminée en utilisant les formules suivantes :

a) Les condensateurs couplés en étoile :

$$C_{con} \lambda = \frac{Q_c \cdot 10^{-3}}{U^2 \varpi} \quad (4.8)$$

Le couplage double étoile : est recommander pour toutes les tensions et les puissances.

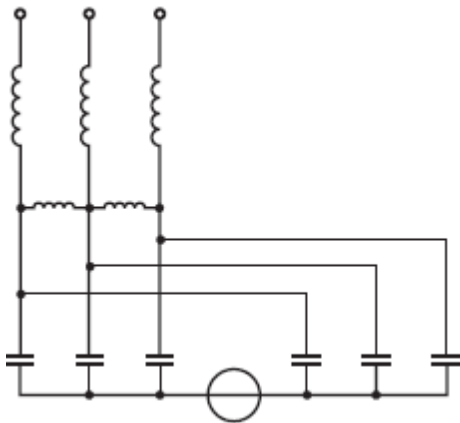


Fig. 4.2 : exemple de couplage double étoile

b) Les condensateurs couplés en triangle :

$$C_{con_{\Delta}} = \frac{Q_c \cdot 10^{-3}}{3U^2 \varpi} \quad (4.9)$$

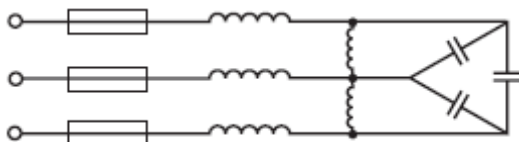


Fig. 4.3 : exemple de couplage triangle

Le couplage triangle : s'utilise pour des tensions inférieures à 12 kV et des puissances maxima de 1500 KVAr.

c) Le nombre de condensateurs statiques est déterminé par la relation suivante :

$$n_{cs} = \frac{Q_C}{q_{CE} \left[ \frac{U_C}{U} \right]^2} \quad (4.10)$$

Où :

$q_{CS}$  : représente la puissance d'un condensateur , KVAR ;

$U_C$  : représente la tension de service , V

$Q_C$  : la puissance de compensation de l'installation, KVAR

En analysant les formules ci-dessus, le mode de couplage en triangle ainsi que l'emplacement des condensateurs du côté haute tension sont préférables du point de vue réduction des capacités et par conséquent, le nombre des condensateurs à mettre en service pour la compensation sera aussi réduit davantage. Car la capacité des condensateurs est inversement proportionnelle au carré de la tension et le mode de couplage en triangle à son tour réduit aussi trois fois la capacité de la batterie de compensation.

### 4.3.2.3. Calcul de la puissance réactive à compenser

Le calcul de la puissance de compensation de l'installation

$$Q_C = P_a (tg \varphi_m - tg \varphi_N) \quad \text{KVAR} \quad (4.11)$$

Où :

$P_a$  :  $P_a$  : La puissance active du groupe de consommateurs, KW ;

$tg \varphi_m$  :  $tg \varphi_m$  : Correspond au facteur de puissance moyen de l'installation

$tg \varphi_N$  : Correspond au facteur de puissance normatif  $\cos \varphi_N = 0.894$

Se fait :

#### 1) Méthode basée sur l'abaissement de la puissance souscrite en tarif

A partir des données électriques de l'installation. Le but est de ne pas payer de consommation d'énergie réactive et de dimensionner correctement les transformateurs, câbles, appareils de commande et de protection.

$$\cos \varphi_m = \frac{\sum_1^n P_{NI} \cos \varphi_i}{\sum_1^n P_{NI}} \quad (4.12)$$

Où :

$P_{NI}$  : La puissance nominale du consommateur, KW ;

n : Le nombre de consommateurs ;

$\cos \varphi_i$  : Représente le facteur de puissance nominal du  $i^{\text{ème}}$  consommateur

## 2) Méthode basée sur la suppression des coûts d'énergie réactive en tarif

A partir de l'énergie consommée. Le but est de supprimer l'énergie réactive qui est facturée, si elle dépasse 50 % de l'énergie active absorbée, pendant les heures de pointe, pleines et de nuit, pendant une période déterminée : par exemple un mois

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + V_r^2}} = \frac{W_a}{\sqrt{1 + \left[\frac{V_r}{W_a}\right]^2}} \quad (4.13)$$

Où :

$W_a$  : Energie électrique active consommée pendant une période déterminée, KWh/mois ;

$V_r$  : Energie électrique réactive consommée pendant une période déterminée, KVar/mois

### 4.3.2.4. choix du mode de compensation

La localisation des condensateurs sur un réseau électrique constitue ce que l'on appelle le "mode de compensation". Elle peut être :

A) Soit globale, exemple :

1- batterie HT sur réseau de distribution HT

2- batterie MT pour un abonné MT

3- batterie BT régulée ou fixe pour abonné BT.

B) Soit par secteur, exemple :

4- batterie MT sur réseau de distribution MT

5- batterie BT ou MT, par atelier ou par bâtiment pour un abonné MT.

C) Soit individuelle

6- La batterie est raccordée en parallèle sur la machine consommatrice d'énergie réactive. Cette compensation est techniquement idéale puisqu'elle produit l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée, et en quantité adaptée à la demande.

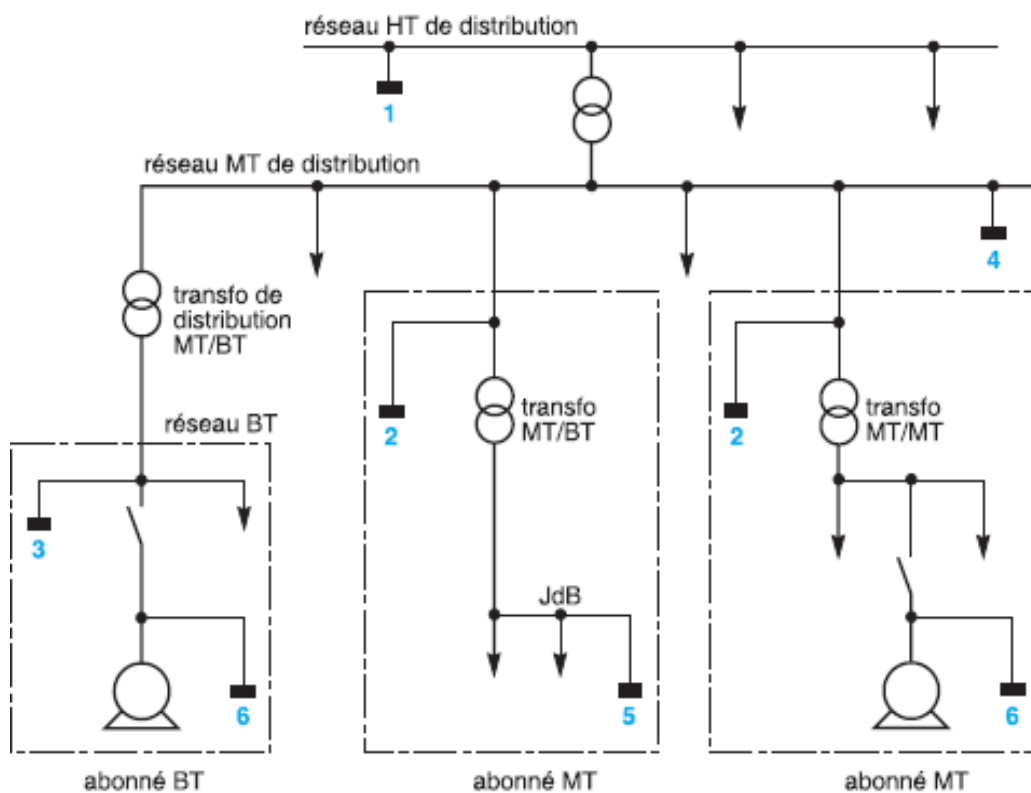


Figure 4.4. Compensation aux bornes d'un transformateur pour accroître sa puissance disponible

La puissance active disponible au secondaire d'un transformateur est d'autant plus élevée que le facteur de puissance de sa charge est grand.

Il est par conséquent intéressant, en prévision d'extensions futures, ou au moment même d'une extension, de relever le facteur de puissance pour éviter l'achat d'un nouveau transformateur.

### 4.3.2.5. choix du type de compensation

La compensation peut être :

- a) Fixe, par délivrance d'une puissance réactive constante
- b) automatique, par délivrance d'une puissance réactive variable qui compense celle consommée par la charge.

#### i. choix de l'équipement de compensation dans les réseaux perturbé par les harmoniques

La présence des récepteurs non linéaires (variateurs de vitesse, onduleurs...) créent des courants et des tensions harmoniques. L'équipement de compensation se choisit en fonction de l'importance de la valeur de ces harmoniques.

Le choix tient compte des paramètres :

- $G_h$  : puissance de tous les générateurs d'harmoniques alimentés par le même jeu de barres que les condensateurs.
- $S_{cc}$  : puissance de court-circuit réelle, si l'alimentation se fait via un transformateur de puissance  $> 2$  MVA,
- $S_N$  : puissance du transformateur amont, si l'alimentation se fait via un transformateur de puissance totale  $< 2$  MVA

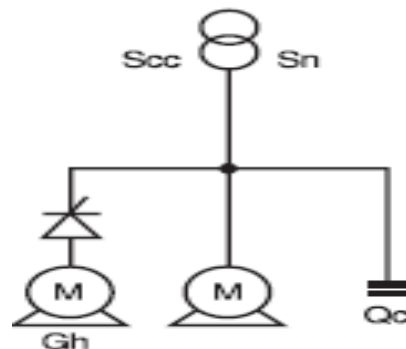


Figure 4.5. schéma de compensation dans les réseaux perturbé par les harmoniques

A partir de ces paramètres, La solution consiste à agencer des ensembles de condensateurs et inductances sous forme de filtres accordés de manière à :

- 1) Compenser la consommation réactive de l'installation
- 2) Absorber les principaux courants harmoniques.

## **B) Compensation d'énergie réactive.**

Compenser l'énergie réactive sur un réseau ou dans une installation électrique présente des avantages d'ordre économique et technique :

1) Avantages économiques en diminuant les factures d'électricité par suppression des consommations excessives d'énergie réactive.

2) Avantages techniques par :

- Augmentation de la puissance disponible au secondaire des transformateurs
- diminution de la chute de tension dans les réseaux de distribution HTA
- diminution des échauffements des câbles pour une puissance active constante.

## **C) Conditions d'amélioration de facteur de puissance**

Pour améliorer le  $\cos\varphi$  on dispose de deux méthodes :

- 1) Méthodes directes : Ces méthodes n'exigent pas de nouveaux investissements, on y attaque directement les causes de la faible valeur de  $\cos\varphi$ . Qui se résume dans la marche à vide fréquente et à faible charge, ainsi que le mode de couplage et la valeur de la tension d'alimentation.
- 2) Méthodes indirectes : ce groupe exige des investissements, il s'agit de l'installation de moyens compensant l'énergie réactive excédante dans le réseau.

## **4.4. Expertise des possibilités de mise en pratique des mesures recommandées pour l'amélioration de l'efficacité énergétiques des entreprises**

### **4.4.1. Amélioration de l'efficacité énergétiques des Cimentières**

1-) Transformation de la voie humide en voie sèche. L'impact sur la consommation calorifique est très important, puisque la voie sèche est fortement moins consommatrice d'énergie calorifique [13].

2-) Modification des préchauffeurs. La perte de charge des préchauffeurs ( $\Delta P_c$ ) s'accroît suivant une loi carré de la production ( $Q_p$ ) :  $\Delta P_c = k_x Q_p^2$ . Or, les lignes de cuisson anciennes dépassent très souvent les capacités de production initialement définies lors de leur construction, la perte de charge de l'ensemble du préchauffeur peut ainsi atteindre des valeurs élevées (> 600 daPa) [13]

3-) Transports matière. Il vaut mieux éviter les transports pneumatiques par pompe dont la consommation électrique est élevée, et privilégier les transports par élévateur, bandes transporteuses, et aéroglisseurs[13 ,79].

4-) Amélioration des lignes de broyage. Qu'il s'agisse du cru comme du ciment, l'installation de séparateurs dynamiques de troisième génération fournit un double gain en énergie électrique et en production pouvant aller jusqu'à 20% pour ces deux postes par rapport à des installations en circuit ouvert sans séparateur ou par rapport à des broyeurs équipés de séparateurs statiques [13-18].

5-) Quant aux broyeurs à boulets, un contrôle de la ventilation interne doit être effectué, car il n'est pas rare de constater une insuffisance de la vitesse de l'air ou des gaz traversant le broyeur, conduisant à un sur broyage et donc à une surconsommation électrique. Une autre possibilité de réduire la consommation électrique des broyeurs à boulets est d'installer, en pré broyage, une presse à rouleaux, mais un tel investissement ne peut se justifier que par la nécessité d'augmenter la capacité de production de l'atelier [13-23,79].

6-) Entretien général. Le taux de fiabilité des différents ateliers doit être le plus élevé possible pour réduire les consommations calorifiques et électriques. Toutes les causes d'arrêt par incident doivent être analysées systématiquement, classées par ordre et les parades nécessaires doivent être mises en place.

7-) Entretien spécifique: suivi des broyeurs à boulets. Ce type de broyeur nécessite un suivi régulier de ses performances énergétiques (kWh/t) car celles-ci peuvent se dégrader en quelques mois. Le bon état des équipements et le niveau de la charge en boulets doivent être vérifiés plusieurs fois par an. Un complément de boulets doit être installé à ces occasions. Par ailleurs, une fois par an, la charge en boulets doit être réassortie en fonction des recommandations des fournisseurs ; les boulets étant extraits du broyeur, ils doivent être triés, la composition de la charge existante sera comparée à la charge définie par une société spécialiste, et un réassortiment sera effectué pour retrouver la composition idéale. Si l'état des équipements internes le nécessite (usure des blindages, cloisons, etc.), leur remise en état doit également être programmée. Un suivi attentif des performances, doublé de visites internes, permet de maintenir à un niveau optimum les performances des broyeurs.

8-) Entretien des fours. Les principaux problèmes rencontrés proviennent d'une instabilité du procédé ou d'un défaut d'entretien mécanique.

- Procédé: Une mauvaise combustion crée des phénomènes de volatilisation suivis de bouchages en partie amont. Les conséquences sont des arrêts de four (et donc une surconsommation calorifique et électrique).

- Entretien mécanique: L'entretien mécanique des joints d'étanchéité en amont et en aval est souvent insuffisant. Un défaut d'étanchéité du joint se traduit par une aspiration d'air extérieur froid, au lieu d'un tirage, via le four diminuera la température de l'air de combustion, réduira la production du four, et augmentera les consommations énergétiques calorifiques et électriques[79]

9-) Ventilation. Le remplacement des registres à venelles à l'aspiration des ventilateurs par des variateurs de vitesse (ventilateur de tirage, ventilateur du four, ventilateurs de soufflage du refroidisseur) est une source significative d'économie en énergie électrique [18,79].

10-) Visites régulières. La pratique de visites d'inspection quotidiennes avec des programmes définis à l'avance permet de réduire les sources de panne, et donc de surconsommation énergétique. Tous les points de contrôle des équipements doivent être listés avec la fréquence des contrôles, et les données à recueillir. Un suivi des machines doit être établi afin de pouvoir pratiquer une maintenance «conditionnelle», mieux adaptée qu'une maintenance «préventive». [15-16]

11-) Autres. Les vérifications habituelles pour toute activité industrielle (rendement des moteurs électriques, gestion du courant réactif, stockage des matériaux à l'abri des intempéries, vérification du bâtiment, etc.) [15]

## **4.4.2. Choix des transformateurs**

Les transformateurs sont des biens d'investissement d'une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. C'est pourquoi il faut, avant de passer commande, et en comparant, porter son attention non seulement sur le prix d'achat mais également sur les coûts d'entretien prévisibles et ceux découlant des pertes à vide (noyau de fer) et des pertes en charge (bobinages) [3,59-62]

### **4.4.2.1. Problèmes observés et solutions techniques**

#### **a) Problèmes observés**

Les transformateurs sont des équipements à relativement haute efficacité. Toutefois, en raison de leur fonctionnement continu et de leur longue durée de vie, une légère augmentation en efficacité peut se traduire par d'importantes économies au fil des ans. Ainsi, le coût supplémentaire des transformateurs « à haute efficacité » conçus en portant une attention particulière à la réduction des pertes énergétiques – pourra être remboursé facilement au cours de la durée de vie utile des transformateurs.

De nombreuses entreprises peuvent ainsi réduire leurs dépenses en optant pour des transformateurs à haute efficacité, et si les gestionnaires tenaient systématiquement compte du calcul des coûts de durée de vie en achetant un transformateur, leur entreprise pourrait réaliser d'importantes économies d'énergie et améliorer sa performance environnementale.

#### **b) Types de pertes**

Un transformateur peut occasionner les types de pertes d'énergie suivants :

– Perte à vide (aussi appelée perte par le fer, ou perte par le noyau) : Provoquée par un courant magnétisant dans le noyau. Cette perte est toujours présente lorsque le



transformateur est connecté, mais elle demeure indépendante de la charge. Il peut s'agir d'une perte d'énergie constante – et donc importante.

- Perte en charge (ou perte par le cuivre, perte par court circuit) : Provoquée par la perte en résistance dans les spires et les raccordements, ainsi que par les courants de Foucault dans la structure métallique et les spires. Elle varie en fonction du carré du courant de charge.

- Perte due au refroidissement (seulement pour les transformateurs refroidis par ventilateur) : Provoquée par la consommation d'énergie du ventilateur. Plus les autres types de pertes sont importants, plus le refroidissement est nécessaire, et plus la perte en refroidissement sera élevée.

- Pertes supplémentaires, produites par les harmoniques.

Les charges non linéaires du réseau, telles que les différentes vitesses des systèmes à moteur, les ordinateurs et les systèmes d'alimentation non interruptible, provoquent des harmoniques dans le réseau : il s'agit de petits courants, dont la fréquence est un multiple de la fréquence principale.

Les harmoniques ont deux impacts négatifs sur les transformateurs : d'une part, ils augmentent la perte en charge, d'autre part, ils augmentent la température des spires et de la structure métallique, réduisant la durée de vie du transformateur.

Les répercussions concrètes des courants harmoniques dépendent en grande partie de leur fréquence, de la conception et de la charge du transformateur.

Les pertes provoquées par les harmoniques augmentent de façon plus que proportionnelle avec l'augmentation de la charge. Par conséquent, dans un transformateur très chargé, les harmoniques peuvent provoquer une perte tellement importante que la température devient trop élevée à certains endroits dans les spires. Cela peut nettement réduire la durée de vie d'un transformateur, et peut même causer des dommages immédiats.

#### **4.4.2.2.Solutions techniques**

Il est possible d'adapter deux éléments de construction afin de réduire les pertes des transformateurs : le noyau et les spires. Toutefois, la conception de transformateurs est une tâche extrêmement spécialisée, qui nécessite une équipe de concepteurs compétents et expérimentés. La plupart des caractéristiques des transformateurs de distribution sont spécifiées par des normes nationales ou internationales.

##### **a) Le noyau**

Il est possible de diminuer les pertes à vide en choisissant un acier plus performant pour fabriquer le noyau voir figure 4.6 ci-dessous. Au fil des ans, davantage d'aciers spécialisés ont été élaborés pour les noyaux de transformateurs:

- Vers 1900, l'acier laminé à chaud est devenu la matière de base pour construire le noyau, qui était constitué de feuilles isolantes individuelles servant à réduire les pertes à vide. L'acier laminé à froid et des techniques d'isolation plus perfectionnées ont progressivement été développés par la suite afin d'améliorer le rendement.

- Les aciers de silicone à grains laminés à froid ont été mis en marché dans les années 1950. Il s'agit d'un premier pas important vers la réduction des pertes à vide.
- Différentes techniques de revêtement et de traitement ainsi qu'un contenu réduit en silicone ont permis de créer les aciers à grains hautement perméables. Ceux-ci demeurent aujourd'hui la matière première pour la fabrication des transformateurs de distribution en Europe.
- De nouvelles techniques d'amélioration par le laser de la technologie des grains de fer ont été initiées au cours des années 1980.
- La récente élaboration du fer amorphe constitue un progrès important, qui permet de réduire les pertes par le fer dans les transformateurs.

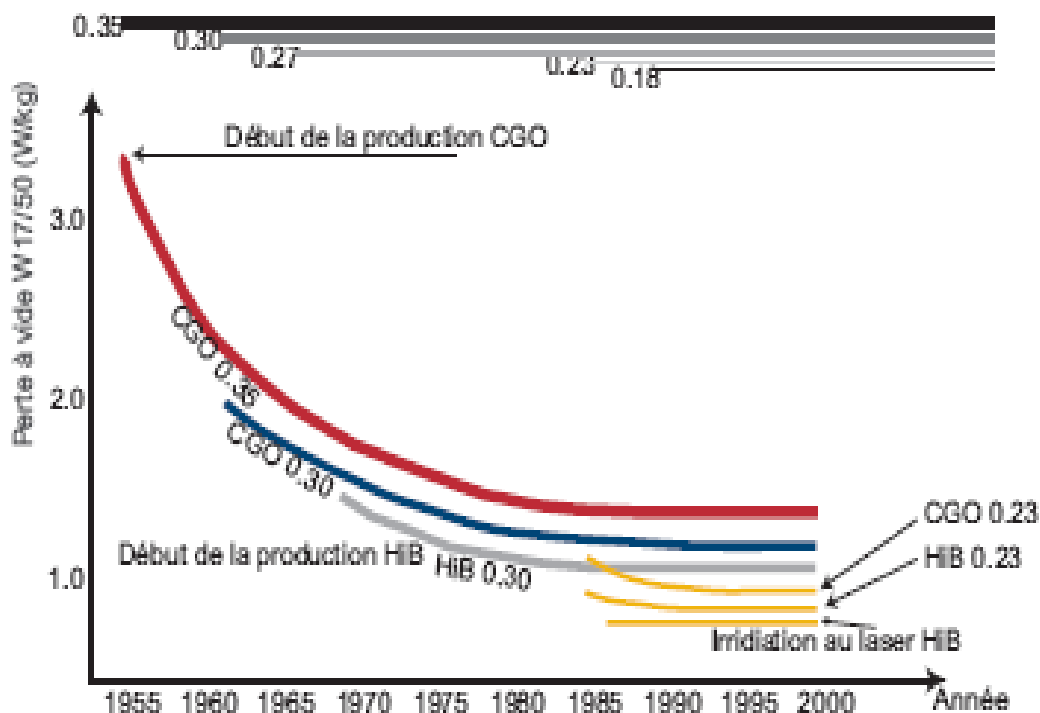


Figure 4.6. : Aperçu et évaluation des différents aciers magnétiques [82]

Outre la sélection de l'acier, la façon de concevoir, de couper, de fabriquer et d'assembler les noyaux des transformateurs de distribution joue un rôle essentiel sur le plan de l'efficacité énergétique. L'augmentation de la taille du noyau permet ainsi de réduire la densité du champ magnétique, ce qui améliore l'efficacité énergétique du transformateur.

Une technologie intéressante en matière d'efficacité est le transformateur à noyau supraconducteur refroidi au nitrogène. Beaucoup de transformateurs de distribution de ce type ont déjà été construits; toutefois, ils demeurent nettement plus coûteux que les transformateurs traditionnels, et semblent donc prometteurs uniquement pour des applications spécialisées.

## b) Les spires

Il est possible de réduire les pertes en cuivre en augmentant la taille du conducteur comportant les spires, ce qui diminue la densité de courant et, par conséquent, l'importance de la perte. Les pertes par le cuivre en charge sont proportionnelles au carré du courant de la charge ; il est donc essentiel de prendre aussi en compte la répartition dans le temps de la charge du transformateur.

### 4.4.2.3. Résultats attendus et stratégies de mise en œuvre

En procédant à l'évaluation économique d'un transformateur, l'acheteur devrait toujours tenir compte du coût global de cycle de vie. Les pertes d'énergie contribuent généralement à deux tiers des coûts de durée de vie d'un transformateur. En raison de la longue durée de vie des transformateurs, les pertes peuvent s'accumuler et atteindre des niveaux considérables. En général, il est plus rentable d'opter pour un transformateur plus efficace, sans compter que c'est également un choix avantageux pour l'environnement.

#### 4.4.2.3.1. Coût des pertes de charge

Les pertes de charge annuelles d'un transformateur sont exprimées en kWh, et peuvent être évaluées à l'aide de la formule suivante :

$$E_{Pertes} = (P_v + n_c^2 P_{cc}) D, KWh \quad (4.14.)$$

Où :

- $P_v$  : Pertes de puissance dans le circuit magnétique au régime à vide, KW ;
- $P_{cc}$  : Pertes de puissance dans le circuit électrique au régime de court-circuit, KW ;
- $D = 8760 \text{ h}$  : Correspond au nombre d'heures dans une année,
- $n_c$  : Correspond à la charge moyenne du transformateur ( $S_c$ ), divisée par la charge nominale ( $S_N$ ):

Le coût de ces pertes ( $T_{CC_{Pertes}}$ ), étalé dans le temps, doit être actualisé pour être ajouté au prix d'achat ( $C_{CC_{Achat}}$ ). Les formules suivantes permettent de calculer ces coûts :

$$T_{CC_{Pertes}} = E_{Pertes} P_{UN} \frac{(1+h)^H - 1}{h}, \quad (4.15)$$

$$C_{CC_{Achat}} = C_{NC_{Achat}} (1+h)^{H-1}, \quad (4.16)$$

Où:

- $P_{UN}$  = le coût moyen de l'énergie estimé pour chaque année, DA/KWh
- $h$  = le taux d'actualisation estimé, %
- $H$  = la durée de vie estimée du transformateur, ans
- $E_{Pertes}$  : Les pertes d'énergie, KWh ;
- $C_{NC_{Achat}}$  : Le coût d'achat non capitalisé, DA

#### 4.4.2.3.2. Coût global de cycle de vie

Le coût global de cycle de vie d'un transformateur est calculé en additionnant plusieurs composantes : le prix d'achat, les coûts d'installation, la valeur des pertes d'énergie, les coûts d'entretien et de réparation au long de sa durée de vie utile, ainsi que les coûts de déclassement. Ces deux derniers éléments sont relativement semblables pour tous les types de transformateurs, et ils sont donc rarement pris en compte pour comparer des transformateurs.

Le prix d'achat et les pertes énergétiques sont les deux principaux facteurs à prendre en compte. Si l'on compare différentes technologies, par exemple les transformateurs secs et les transformateurs immergés dans l'huile, il faut également tenir compte des coûts d'installation, qui peuvent sensiblement varier.

$$C\tau = E_{Pertes} P_{UN} \frac{(1+h)^H - 1}{h} + C_{NC_{Achat}} (1+h)^{H-1}, DA \quad (4.17)$$

#### 4.4.2.3.3. Délais de rentabilité

Le délai de rentabilité des investissements en transformateurs à haute efficacité, peut être déterminé en résolvant le système d'équation suivant :

$$\Delta C\tau_{I+1,I} = \Delta I_{I+1,I} (1+h)^{H-1} + \Delta E_{I+1,I} P_{UN} \frac{(1+h)^H - 1}{h} = 0, \quad (4.18)$$

Où :

$\Delta I_{I+1,I}$  : Représente la différence entre les investissements respectivement du transformateur d'ordre I+1 et I

$\Delta E_{I+1,I}$  : Représente la différence entre les pertes d'énergie respectivement du transformateur d'ordre I+1 et I

Après traitement, le délai de rentabilité prend la forme suivante :

$$H_r = 1 + \frac{\text{Log} \frac{\Delta E_{I+1,I} P_{UN}}{(1+h)(\Delta E_{I+1,I} P_{UN} - \Delta I_{I+1,I}) + \Delta I_{I+1,I}}}{\text{Log}(1+h)}, \text{ ans} \quad (4.19)$$

Il suffit ensuite de comparer la valeur de  $H_{r_{I+1,I}}$  calculée selon la formule ci-dessus, avec la durée de vie H, en utilisant le test suivant :

$$H_{r_{I+1,I}} < H \quad (4.20)$$

Si l'inégalité est significative, on choisit le transformateur le plus éco énergétique de référence I+1 qui recouvre les pertes de puissance sur toute sa durée de vie, où non, on

incrémente l'indice I et on répète le test. Selon l'utilisation voulue. Ainsi, on peut dire qu'il existe un type de transformateur optimal pour chaque site industriel.

#### 4.4.2.3.4.Économies de coûts

Comme le démontre les tableaux 4.1. et 4.2, les délais de rentabilité des investissements en transformateurs à haute efficacité sont courts, surtout relativement à leur longue durée de vie (25 à 30 ans). Si l'on remplace un transformateur de 1000 KVA par un transformateur de 1250 KVA par exemple, le délai de rentabilité ne dépassera pas le un quart de sa durée de vie 8.14 année et le gain sera de 7,48 fois les investissements supplémentaires capitalisées sur toute la durée de vie du transformateur le plus économique.

Tableaux 4.1. Caractéristiques électriques des transformateurs

N°	Type	Pav, KW	Pcc,KW	Sc ,KVA	Pt, KW	E=Pt.D(8760h) KWh
1	1000/5.5	2124	6612	1074.2	9.846	86251
2	1250/5.5	2413	6133	1074.2	6.942	60812

Tableau 4.2. Economies des coûts

Coût d'achat du transformateurs N°2 $C_{2Achat}$ , DA	Coût d'achat du transformateurs N°1 $C_{1Achat}$ , DA	Différence entre les coûts d'achat des transformateurs $\Delta I_{2,1} = C_{2Achat} - C_{1Achat}$ DA	Différence entre les pertes d'énergie $\Delta E_{1,2}$ , KWh	Coût unitaire $P_{UN}$ , DA/KWh	Coût des pertes $\Delta E_{1,2} P_{UN}$
957845	891955	65890	25439	0.4	10175.6

Suite du tableau 4.2. Economies des coûts

Taux d'amortissement h : %	Durée de vie : H, année	Délai d'amortissement : $Hr$ : année	Economie : Econ,DA	Economie relative à l'investissement supplémentaire Econ/ $\Delta I_{2,1}$ : DA/DA
7%	25 à 30 année	8.14	492590.6	7.48

#### 4.4.2.4.Conclusion

Les transformateurs à haute efficacité fonctionnent grâce à une technologie éprouvée et fiable. En choisissant les matériaux adéquats, des dimensions et une conception appropriées, il est possible de réduire considérablement les pertes d'un transformateur. Ainsi, les transformateurs industriels offrent un grand potentiel d'économies de coûts et d'énergie.

En fait, en achetant un transformateur, il faut non seulement prendre en compte le prix d'achat, mais aussi le coût global de cycle de vie. Ce coût comprend à la fois les pertes à vide et les pertes en charge. Sur le plan économique, le transformateur ayant le plus faible coût global représente la meilleure option. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un modèle à haute efficacité. Il est ensuite essentiel de procéder à une étude du réseau afin de déterminer les niveaux d'harmoniques du réseau relié au transformateur, étant donné que ces harmoniques peuvent avoir de graves répercussions à la fois sur la durée de vie et sur les pertes du transformateur.

Les recommandations suivantes permettent d'éviter de façon simple les pertes importantes inutiles :

- En achetant un transformateur à haut rendement énergétique en plus du modèle classique.
- Mettre en place la politique visant à n'acquérir que des transformateurs avec une réduction des pertes de 20% pour les types refroidis à l'air. Une telle politique permettra de réduire de façon significative le coût global de cycle de vie de l'ensemble des transformateurs de l'entreprise.
- Si des transformateurs de 40 ans ou plus sont encore utilisés, il est sage, sur le plan économique, de les remplacer par de nouveaux transformateurs à haute efficacité, même s'ils n'ont pas atteint la fin de leur durée de vie. En effet, ces plus vieux transformateurs subissent de telles pertes qu'il est justifié de les remplacer immédiatement.

Pour résumer, les transformateurs à haute efficacité peuvent représenter un important avantage pour les sociétés industrielles, ainsi que pour l'ensemble de l'économie et pour l'environnement.

### **4.4.3. Recherche du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs**

les pertes théoriques des transformateur en fonction de la charge débitée, ainsi que les points de fonctionnement lors de Marche en Parallèle des transformateurs peuvent être déterminer en recourant à la méthode de seuil.

#### **4.4.3.1. Détermination du point de fonctionnement par rapport à une Marche en Parallèle**

1) Lorsque deux transformateurs sont en service dans une sous-station, deux choix se présentent à l'exploitant :

- Soit fonctionner avec un seul transformateur ;
- Soit avec deux transformateurs en parallèle.

- a) Lorsque deux transformateurs de puissances différentes sont en service dans une sous-station, deux choix se présentent à l'exploitant :
- Soit fonctionner avec le transformateur le moins puissant ;
  - Soit avec le transformateurs de puissance élevée.

Dans ce cas les pertes pour un seul transformateur en service sont exprimées par :

\*) Transformateur 1 (moins puissant) :

$$Pt_1 = P_{v1} + P_{CC1} \frac{S_{C1}^2}{S_{N1}^2} \quad (4.21)$$

\*) Transformateur 2 (plus puissant)

$$Pt_2 = P_{v2} + P_{CC2} \frac{S_{C2}^2}{S_{N2}^2} \quad (4.22)$$

La commutation se fera au point de fonctionnement économique ( $Sce_{1,2}$ ), ou les pertes sont égales :

$$Pt_1 = Pt_2 \quad (4.23)$$

De cette égalité, on obtient la charge de fonctionnement économique

$$Sce_{1,2} = S_{N1} S_{N2} \sqrt{\frac{P_{v2} - P_{v1}}{P_{CC1} S_{N2}^2 - P_{CC2} S_{N1}^2}} \quad (4.24)$$

Suivant la charge débitée par le transformateur, il faudra opter pour la marche du transformateur le moins puissant pour les charges inférieures à  $Sce_{1,2}$  et pour la marche du transformateur le plus puissant si la charge sera supérieure à  $Sce_{1,2}$

- b) Lorsque deux transformateurs de puissances différentes sont en service dans une sous-station, deux choix se présentent à l'exploitant :
- Soit fonctionner avec un seul transformateur le moins puissant ;
  - Soit avec les deux transformateurs en parallèle.

Dans ce cas la répartition de la charge pour deux transformateurs en parallèle est déterminée de la manière suivante :

$$*) \text{ Transformateur 1 : } S_{C1} = \frac{S_{N1}}{(S_{N1} + S_{N2})} S_C \quad (4.25)$$

$$*) \text{ Transformateur 2 : } S_{C2} = \frac{S_{N2}}{(S_{N1} + S_{N2})} S_C \quad (4.26)$$

Et les pertes totales pour les deux transformateurs en service et mis en parallèles sont exprimées par :

$$P_T = P_{t1} + P_{t2} = P_{V1} + P_{V2} + (P_{CC1} + P_{CC2}) \left( \frac{S_C}{S_{N1} + S_{N2}} \right)^2 : \quad (4.27)$$

De la même manière que précédemment, la commutation se fera au point de fonctionnement économique  $S_{ce_{1.1+2}}$ , ou les pertes sont égales :

$$P_{t1} = P_T \quad (4.28)$$

De cette égalité, on obtient la charge de fonctionnement économique :

$$S_{ce_{1.1+2}} = S_{M1} (S_{N1} + S_{N2}) \sqrt{\frac{P_{V2}}{(S_{N1} + S_{N2})^2 P_{CC1} - S_{N1}^2 (P_{CC1} + P_{CC2})}} \quad (4.29)$$

En faisant le test suivant :

$$S_C > S_{ce_{1.1+2}} \quad (4.30)$$

Si l'inégalité est satisfaisante, on opte pour la mise en marche économique des deux transformateurs en parallèle.

c) Lorsque deux transformateurs de puissances différentes sont en service dans une sous-station deux choix se présentent à l'exploitant :

- Soit fonctionner avec un seul transformateur le plus puissant ;
- Soit avec les deux transformateurs en parallèle.

Alors, dans ce cas la charge du régime économique sera déterminée à partir de l'égalité des pertes relatives au transformateur le plus puissant mis en marche seul comparative avec les pertes de ce dernier ajoutées des pertes du second transformateur si on opte la marche en parallèle

$$P_{t2} = P_T \quad (4.31)$$



D'ou, la charge économique sera égale :

$$Sce_{2..1+2} = S_{N2}(S_{N1} + S_{N2}) \sqrt{\frac{P_{V1}}{(S_{N1} + S_{N2})^2 P_{CC2} - S_{N2}^2 (P_{CC1} + P_{CC2})}} \quad (4.32)$$

$$S_C > Sce_{2..1+2} \quad (4.33)$$

En comparant la charge réelle transmise par rapport au critère économique déterminé, si la condition est remplie, il est avantageux de passer de la marche simple du transformateur le plus puissant à la marche en parallèle du second transformateur.

#### 4.4.3.2. Collecte des données

L'objet de l'étude s'est porté finalement sur les deux transformateurs installés dans la sous station du broyage de la cimenterie de El-Ma-Labiod. Le tableau 1 ci-dessous montre les principales caractéristiques de ces deux différents transformateurs.

Tableau 4.3. Caractéristiques électriques des transformateurs

Type du transformateur	Pertes à vide $P_V$ , W	Pertes de court circuit $P_{CC}$ , W
OASA SAVASIENE 1000 KVA	2124	6692
OASA SAVASIENE 1600 KVA	2700	6061

Les différents points du régime de fonctionnement ( $Sce_{1,2}$ ,  $Sce_{1,1+2}$  et  $Sce_{2,1+2}$ ,) sont calculés d'après les relations (4.24, 4.29, 4.32) et présentés dans le tableau 4.4 ci-contre

Tableau 4.4 Régime de fonctionnement économique des transformateurs de marche en parallèle

Courbes de pertes de puissances	1 et 2	1 et 1+2	2 et 1+2
Charge des Points de fonctionnement économique $Sce$ , KVA	365	750	2101
Pertes minimales $P_{min}$ , KW	3.02	5.88	13.15

Suite Tableau 4.4. Régime de fonctionnement économique des transformateurs de marche en parallèle

Courbes de pertes de puissances	1	2	1+2
Charge réelle $Scr$ , KVA	1074.2	1074.2	1074.2
Pertes réelles $Ptr$ , KW	9.85	5.43	7
Charge limite relative au transformateur le moins puissant $Scl_1$ , KVA	1600	1600	1600
Pertes limites $Ptl_1$ , KW	19.26	8.76	9.65
Economie	Economie réalisée au voisinage de la charge réelle $Er = Ptr_{max} - Ptr_{min}$  $Er = 4.42$	Economie réalisée au voisinage de la charge limite $El = Ptl_{max} - Ptl_{min}$ $El = 10.5$	Economie espérée $Ee = El - Er$ $Ee = 6.08$

### 4.4.3.3.Représentation graphique

Les différentes courbes des pertes totales ainsi que les différents points de fonctionnements ( $Sce_{1,2}$ ,  $Sce_{1,1+2}$  et  $Sce_{2,1+2}$   $Scr$  et  $Scl_1$ ) de deux transformateurs (1) et (2) sont représentées sur le graphique ci-dessous figure 4.7. Afin de minimiser les pertes, il faudrait toujours fonctionner sur la courbe la plus basse. Pour cet exemple, comme la différence pour une charge de 0 à ( $Sce_{1,2}$ ) est très faible, il faut enclencher le transformateur 2 jusqu'à ( $Sce_{2,1+2}$ ) et ensuite opter pour une Marche en Parallèle. L'économie espérée entre la charge réelle ( $Scr = 1074.2$  KVA) comparative à la charge de référence relative à la charge maximale du transformateur le moins puissant ( $Scl1 = 1600$  KVA) est de l'ordre : 6.08 KW.

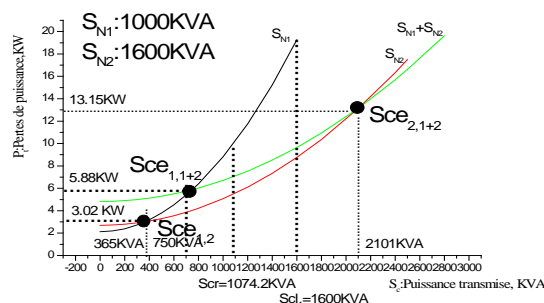


Figure 4.7.Détermination graphique des points de fonctionnement économique entre deux transformateurs respectivement de puissance 1000 et 1600 KVA de la sous station de broyage de la cimenterie de El-Ma-Labioud

## **4.5. Tarification de l'énergie électrique**

Il n'existe pas de mécanisme universel de facturation de l'énergie électrique. Chaque pays adopte généralement un principe qui lui est propre, prenant en compte la nature de ses moyens de production et le comportement des consommateurs.

L'analyse des modes de facturation en vigueur dans le monde fait cependant apparaître des principes généraux communs. Pour fixer les idées et à titre d'exemple, nous avons exposés ci-avant en détail la tarification adoptée en Algérie par SONELGAZ et pour certains pays du monde voir chapitre 1.5 :

Quel que soit le pays que l'on considère, le coût de l'énergie électrique est à tout instant étroitement lié aux moyens mis en oeuvre pour la produire et à la valeur de la demande. Il varie ainsi au cours de la journée et tout au long de l'année.

Pour faire face à ce problème et garantir à chacun de ses clients une facturation correspondant à son profil de consommation, SONELGAZ a mis en place trois séries de tarifications de l'énergie électrique pour chaque catégorie de tension de livraison :

- Série 30 Abonné H.T 400, 220, 90, 60 KV
- Série 40 Abonné M.T 30, 22, 10, 505 KV
- Série 50 Abonné B.T, 0.110, 0.220 et 0.380 KV

Chaque série de tarif possède des options et des périodes tarifaires permettant à chaque client de choisir la formule la mieux adaptée à ses besoins et lui garantissant l'optimisation de sa facture voir chapitre 1.5. tableau 1.6.

### **4.5.1.Choix de l'option du tarif**

Le choix dans les tarifs proposés est tout à fait ouvert.

En fonction des caractéristiques de sa demande :

- niveau de la puissance nécessaire ;
- régime d'utilisation de l'énergie ;
- possibilité de sa modulation.

L'abonné avec ou sans le conseil de la SONELGAZ, choisit, parmi tous les tarifs offerts, celui qui minimisera ses factures d'énergie voir chapitre 1.5 tableau 1.6 relatif aux barèmes des prix abonnée moyenne et haute tension..

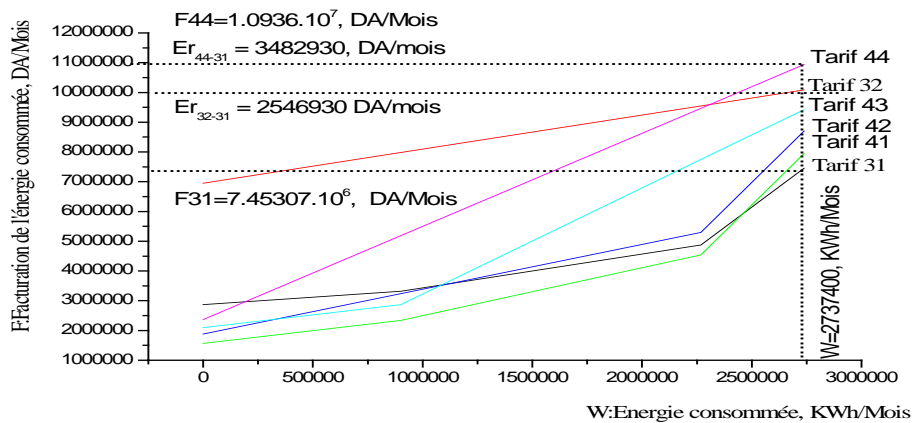


Figure 4.8. choix de l'option du tarif

Pour une structure de consommation donnée, le client choisit l'option qui minimise sa facture, en utilisant le graphique ci-dessus figure 4.8. A titre d'exemple : L'unité de traitement de phosphate de la mine de Djbel El Onk ayant des installations fortes consommatrices d'électricité (concassage, broyage, débouillage, calcination, lavage, séchage, dépoussiéreur...etc.) susceptibles de fonctionner la nuit et aux heures pleines a probablement intérêt à choisir la série 30 abonné haute tension tarif postes horaires 31. Car sa quantité d'énergie consommée ( $W = 2737400 \text{ KWh}$ ) est nettement visible sur le graphique qu'elle peut apporter une économie de l'ordre de ( $E_{r_{32-31}} = 2546930, \text{DA/mois}$ ) si en choisissant le tarif 31 par rapport au poste horaire 32 de la même série, de plus jusqu'à cette consommation le tarif 31 est le plus économique de tout les tarifs proposés, donc, ce tarif convient bien pour la mine de Djebel-El-Onk. dans le cas contraire l'unité de traitement de phosphate a sans doute intérêt à choisir le tarif 32. L'unité peut aller au-delà de cette première approche si elle décide de modifier son comportement afin de bénéficier des opportunités tarifaires, par exemple :

- En jouant sur ses capacités de production et de stockage, ce qui lui permet d'effacer des consommations en temps réel

- En remplaçant, pendant certaines périodes de l'année, des fournitures électriques par d'autres sources d'énergie : gaz naturel, fuel, autoproduction, etc...

## 4.5.2. Conclusion

Avec le menu du tarif proposé par la SONEGAS, les entreprises industrielles sans exception peuvent optimiser leur tarif en choisissant l'option qui convienne en concordance avec leur prévision en consommation d'énergie dans le future. Cette mesure entraîne des économies équivalentes à l'énergie consommée pour les consommateurs d'une part et d'autre part entraîne des économies équivalentes à des coûts de fourniture de l'électricité. Et toutes surestimation en prévision entraîne des dommages pour la SONEGAS sous forme d'investissements improductifs tant pour les entreprises des dépenses superflues. Soit disant pour le cas de la mine de Djebel-El-Onk, en choisissant le tarif 31 nous pouvons atteindre des économie de l'ordre de ( $E_{r_{32-31}} = 2546930, \text{DA/mois}$ ). Cette possibilité d'économies est réalisée sans recours à des investissements supplémentaires mais par voies d'analyse du tarif appliquée, ce qui rend l'application de cette mesure en prioritaire.

## CHAPITRE 5.

### 5. Economie de l'énergie électrique aux conditions de la consommation optimale

#### 5.1. Economie d'énergie dans les lignes de transport et de distribution

##### 5.1.1. Première possibilité pour économiser de l'énergie dans les lignes

La section d'un conducteur joue un rôle très important. L'augmentation de la section entraîne la diminution des pertes selon la loi de joule et d'autre part augmente les investissements [83]. Donc la recherche de la section optimale par les méthodes d'optimisation est une solution unique pour justifier le choix et l'utilisation rationnel du conducteur.

La variation du prix d'achat du câble en fonction de la section suit la loi suivante :

$$P_{CON} = F_C + Gs \quad , \text{ DA/KM} \quad (5.1)$$

Où :

- $P_{CON}$  : Le prix d'achat du conducteur, DA/KM
- $F_C$  et  $G$  Sont des constantes
- $s$  : la section du câble,  $m^2$

La constante  $G$  peut être déterminé en utilisant la relation suivante :

$$G = \frac{P_{CON2} - P_{CON1}}{s_2 - s_1} \quad (5.2)$$

Le coût total en fonction du prix d'achat ( $A_n P_{CON} Lc$ ) et des dépenses d'exploitation ( $Cex$ ) peut être composé de la manière suivante :

$$C_{tot} = A_N P_{CON} L + Cex = A_n (F_C + Gs)L + \frac{P_{UN} N_C L I^2 D \cdot 10^{-3}}{s}, \text{ DA} \quad (5.3)$$

Il est minimum pour la section  $S_e$  telle que

$$s_e = I \sqrt{\frac{P_{UN} N \sigma D \cdot 10^{-3}}{A_n G}}, \quad \text{mm}^2 \quad (5.4)$$

Où :

- $A_n$  : Représente l'annuité d'amortissement du prix d'achat du câble
- $P_{UN}$  : prix de l'énergie, DA/KWh
- $N$  : Nombre de conducteurs
- $\sigma$  : La résistivité du conducteur  $\Omega \text{mm}^2 / \text{KM}$
- $D$  : Nombre d'heures de service
- $S_e$  : La section économique du conducteur,  $\text{mm}^2$
- $L_c$  : La longueur du conducteur, KM

Et plus clairement voir la solution graphique figure 5.1 ci-contre

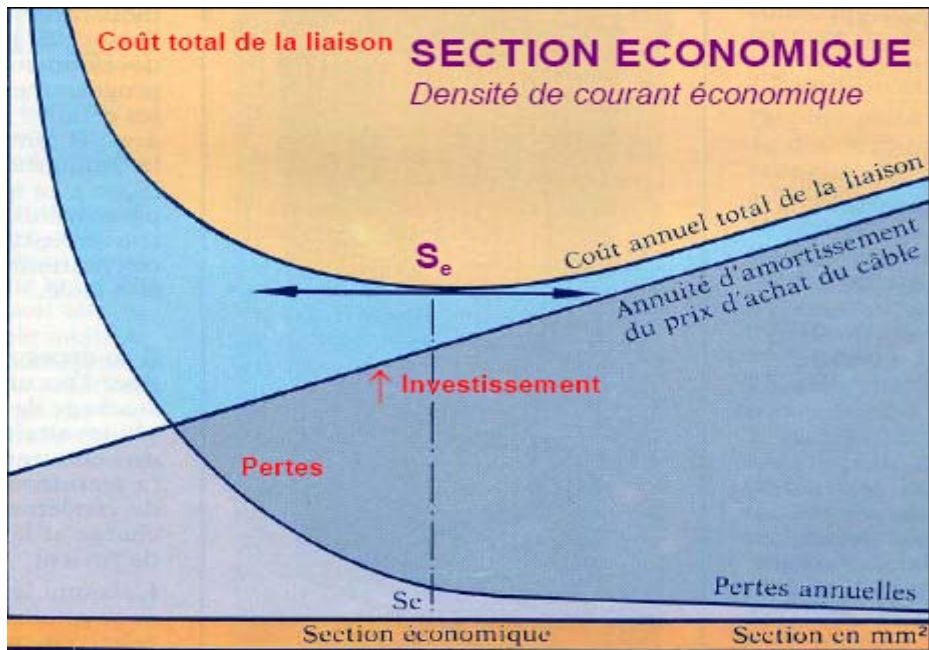


Figure 5.1. Section économique [83]

### 5.1.2. Deuxième possibilité pour économiser de l'énergie dans les lignes

En partant de la relation des pertes par effet joules dans les conducteurs

$$\Delta P = RI^2, \quad \text{KW} \quad (5.5)$$

Où :

- $R$  : Représente la résistance du conducteur,  $\Omega$

Mais le courant circulant dans les conducteurs peut être tiré de la puissance active transmise (P) , de la tension appliquée (U) et du facteur de puissance  $\cos\varphi$

$$I = \frac{P}{U \cos\varphi} \quad , \quad A \quad (5.6)$$

En remplaçant le courant de l'équation (5.6) dans l'équation (5.5), on obtient l'équation des pertes sous la forme suivante

$$\Delta P = R \left[ \frac{P}{U \cos\varphi} \right]^2, \quad \text{KWh} \quad (5.7)$$

Donc, pour diminuer les pertes dans les lignes on peut agir de la manière suivante c'est à dire :

- 3) En augmentant la tension du réseau on peut diminuer les pertes
- 4) En diminuant les pertes actives inutiles, on peut diminuer les pertes
- 5) En augmentant le facteur de puissance on peut diminuer les pertes

Plus clairement nous avons présenté un graphique figure 5.2. ci-dessous qui représente les pertes en pourcent fonction de la variation du facteur de puissance et du facteur de charge de la ligne de transport reliant la cimenterie de El-Ma-Labiod au poste de distribution de El-Hammamet. On se donne la puissance ( $P_n = 9.2 \text{ MW}$ ) que la ligne peut transporter par phase sur une distance de ( $L_c = 41 \text{ KM}$ ) de résistance ( $R = 36.9 \Omega$ ) sous une tension ligne à ligne de 90 KV, Pratiquement le facteur de charge et le facteur de puissance réelles respectivement sont de l'ordre de ( $K_c = 72\%$ ,  $\cos\theta = 0.9274$ )

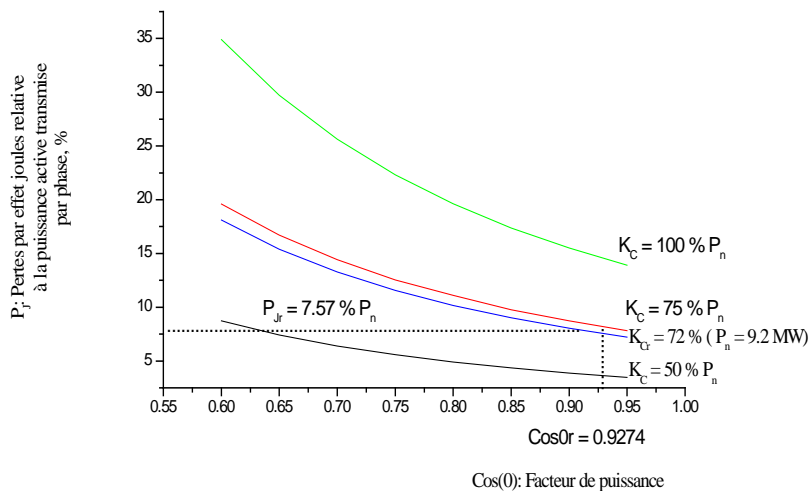


Figure 5.2. Dépendance des pertes par effet joules en fonction du facteur de puissance et le facteur de charge de la ligne de transport reliant la cimenterie de El-Ma-Labiod au poste de distribution de El-Hammamet.

En analysant le graphique ci-dessus 5.2, malgré le facteur de puissance réelle est meilleur et au dessus de la norme (  $\cos \theta_{Nor} = 0.894$  ) en plus la ligne est chargée à 72 % de sa capacité nominale. les pertes en pourcent (  $P_{jr} = 7.57 \% P_n$  ) comparativement aux normes d'exploitation des lignes (  $P_{jnor} = 5 \% P_n$  ) restent élevées.

Donc, nous concluons que le recours à l'élévation de la tension ou bien au procédé de remplacement du conducteur par un autre de faible résistance et de section économique comparativement au conducteur en exploitation se sont des solutions faisables

En plus de la puissance active dissipée par effet joule, la ligne absorbe et génère une certaine quantité de puissance réactive qui dépend du type et de la longueur de la ligne :

a) Puissance réactive absorbée par la ligne

$$Q_{ril} = X_L I^2, \text{ KVAR} \quad (5.8)$$

c) Puissance réactive générée par la ligne

$$Q_{rcl} = \frac{U^2}{X_C}, \text{ KVAR} \quad (5.9)$$

Où :

-  $X_L, X_C$  : Représentent respectivement les réactances inductives et capacitives de la ligne et dont les valeurs spécifiques à la longueur respectivement sont (  $0.5 \Omega / Km$  et  $300000 \Omega / Km$  ) pour les lignes aériennes et (  $0.1 \Omega / Km$  ,  $3000 \Omega / Km$  ) pour les câbles souterrains.

- I : Courant de la ligne, A ;
- U : Tension de la ligne, V.

L'accroissement de la tension favorise l'accroissement de la puissance générée par la ligne et en même temps réduit le courant de charge et par conséquent réduit la puissance réactive absorbée par la ligne.

Les lignes aériennes absorbent 5 fois la puissance réactive inductive et génèrent 100 fois de puissance réactive capacitive comparative par rapport aux câbles souterrains. La puissance réactive absorbée par la ligne augmente tandis que celle générée diminue avec l'augmentation de la longueur.

### **5.1.3. Troisième possibilité pour économiser de l'énergie dans les lignes**

Si le problème de la capacité du transport, de la température et des pertes d'énergie électrique persistent encore au niveau des câbles classiques, de préférence le recours à



des matériaux supraconducteurs est une solution envisageable, mais reste à justifier leur utilisation. Ces matériaux sont avantageés par [83] :

- la capacité de transport élevée
- Pertes réduites moins de 1% comparativement à 5 à 8% pour les câbles classiques
- Indépendance avec l'environnement
- Transmettre des densités de courant élevées jusqu'à  $1000 \text{ A/mm}^2$
- Possède un bon comportement mécanique
- Possède un bon comportement thermomécanique .

Mais ces matériaux ont des objectifs économiques de l'ordre de 10 \$ / KA.m. mais actuellement son coût atteint 200 \$/KA.m. ce qui le rend non commercialisée.

**Prototypes** : 400 m de câble à Detroit (USA), 90 m à Copenhague (DK)

**Projets** : Colombus (USA), Detroit USA), Copenhague (DK), Long Island (USA)

**Perspectives** : Industrialisation à partir (2015) selon les constructeurs

## 5.1.4. Conclusion

Les travaux de recherche sur l'économie d'énergie dans les lignes de transport et distribution, ont permis d'aboutir à la conclusion suivante :

- 1) Le recours à la section économique donne l'avantage d'un meilleur rendement, l'économie d'énergie que nous pouvons réaliser rembourse dans un délai court, l'écart de prix d'achat entre la liaison économique et la liaison technique. Au delà, elle devient un gain effectif pour l'entreprise
- 2) Le recours à l'élévation de la tension diminue les pertes actives et génère plus de puissance réactive capacitive et par conséquent diminue la puissance réactive inductive absorbée
- 3) Le recours à l'augmentation du facteur de puissance diminue les pertes actives
- 4) Le recours à la diminution des puissances actives inutiles diminue les pertes
- 5) Le recours à des supraconducteurs de pertes réduites moins de 1% comparativement à 5 à 8 % pour les câbles classiques

## **5.2. Economie d'énergie dans les transformateurs**

### **5.2.1. Recherche du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs- Méthode de seuil**

#### **5.2.1.1. Introduction**

Nous savons que la puissance électrique consommée au primaire du transformateur se retrouve, changée en une puissance magnétique dans le fer, d'où transformée de nouveau, elle réapparaît sous la forme de puissance électrique au secondaire [59-61]. Toutefois, au cours de ce processus, surviennent des pertes non négligeables [9,28,62-63] dont il est utile de connaître les causes, afin de prendre toutes dispositions propres à les réduire c'est l'objectif visé dans cet article.

#### **5.2.1.2. But et conditions**

Le but visé dans cet article est d'identifier le problème des pertes d'énergie électrique dans les conditions réelles de fonctionnement des transformateurs de distribution de la cimenterie de El-ma-labiod Algérie et d'établir le régime rationnel de fonctionnement de ces transformateurs.

#### **5.2.1.3. Recherche du régime rationnel**

##### **A). Identification du problème**

Nous avons examiné le régime de fonctionnement des transformateurs de distribution et les changements survenus de la puissance consommée par les différents appareils électriques de la chaîne de fabrication du ciment [9,16,18], nous avons constaté que certains transformateurs les plus puissants fonctionnant avec une charge réduite donnent des pertes à vide relativement importantes. D'autres transformateurs de nature moins puissants sont trop chargés et produisent des pertes considérables qui croissent avec la charge. Ces pertes d'énergie électrique non désirées entraînent, dans tous les cas, un accroissement des dépenses superflues et accélèrent le vieillissement prématuré des transformateurs surchargés [27,64-65]. Conscient de l'importance du problème et après discussion avec les spécialistes de l'entreprise de fabrication du ciment, le facteur des pertes d'énergie électrique apparaît comme un axe prioritaire de sa recherche. En se basant sur cette hypothèse pratique, la sélection des transformateurs éco-énergétiques, de meilleur régime de fonctionnement et mis en service successivement par différentes méthodes de recherche scientifique permet à l'entreprise de recouvrir les investissements et de recevoir un gain appréciable sur toute la durée de vie de ces transformateurs. Donc cette technique peut être considérée comme une possibilité de recherche relative à l'économie d'énergie électrique pour cette entreprise.

## B). Choix des paramètres

Les paramètres qui influent sur les pertes de puissance dans les transformateurs de distribution [4,27,40,52,6560-61] sont :

- P : Puissance active transmise par le transformateur, KW ;
- Q : Puissance réactive transmise par le transformateur, KVAR ;
- $P_v$  : Pertes de puissance dans le circuit magnétique au régime à vide, W ;
- $P_{cc}$  : Pertes de puissance dans le circuit électrique au régime de court-circuit, W ;
- $S_n$  : Puissance nominale du transformateur, KVA.

Nous écrivons sous forme mathématique l'équation fonctionnelle des paramètres cités ci-dessus :

$$p_t(P_v, P_{cc}, S_n, P, Q) = 0 \quad (5.10)$$

nous ferons les commentaires suivants sur le choix de ces paramètres :

### \*) Pertes indépendantes de la charge transmise

Les pertes de puissance dans le circuit magnétique sont indépendantes des puissances transmises (P) et (Q). En effet les facteurs d'exploitation dont elles dépendent sont l'induction maximale (Bm) et la fréquence (f) [59-61]. Or, la fréquence (f = 50 Hz) du réseau alimentant les machines à courant alternatif statique où dynamique de la chaîne de fabrication de ciment est constante et par conséquent (Bm) l'est aussi. Donc les pertes de puissance ( $P_v$ ) dans le circuit magnétique du transformateur étudié sont constantes et inévitables.

$$P_v = Cte, W \quad (5.11)$$

### \*\*\*) Pertes croissant avec la charge

En se basant sur les relevées des puissances transmises (P) et (Q) [9,16,18] et sur les études bibliographiques[27-28,52,59-60,62-63,65], les pertes par effet joule dans les enroulements parcourus par le courant de charge  $I_c$  sont proportionnelles au carré de  $I_c$ .

$$w = RI_c^2, W \quad (5.12)$$

Nous avons remplacé les paramètres suivants par les relations physiques équivalentes

$$R = \frac{P_{cc}}{I_n^2}, \quad \Omega \quad (5.13)$$

$$I_c = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U}, \quad A \quad (5.14)$$

$$S_c = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad KVA \quad (5.15)$$

$$S_n = UI_n, \quad KVA \quad (5.16)$$

où:

- R : Résistance du circuit électrique du transformateur,  $\Omega$  ;
- $I_n$  : Courant Nominal, A ;
- U : Tension nominale, KV.

Après traitement, l'équation fonctionnelle (5.12) des pertes de puissance active en fonction de la charge transmise prend la forme suivante :

$$w = \frac{P_{cc} S_c^2}{S_n^2}, \quad W \quad (5.17)$$

Etant donnée que l'expression mathématique (5.17) de la variation des pertes de puissance active en fonction de la puissance transmise est connue et par conséquent les pertes à vide relatives à chaque transformateur sont aussi connues (5.11). Donc la forme générale du modèle mathématique des pertes de puissance dans le transformateur peut à présent s'écrire :

$$P_t = \frac{P_{cc} S_c^2}{S_n^2} + P_v, \quad W \quad (5.18)$$

## C) Choix de la méthode de recherche

Pour choisir le régime rationnel de fonctionnement de plusieurs transformateurs identiques, mis en service successivement et pour obtenir le minimum de pertes. La méthode de seuil fournit un excellent outil pour définir les conditions de validité de différentes solutions possibles et choisir parmi elles la plus adéquate [32,34-35]. Cette méthode trouve son origine dans l'études des fonctions, appelée analyse en mathématique permet d'obtenir une réponse rapide.

### 5.2.1.4. Recherche analytique des points critiques - Méthode de Seuil

Supposons plusieurs transformateurs disponibles, tous à sec et ayant les mêmes paramètres techniques. Alors la recherche du critère de passage au régime économique de fonctionnement de n-1 à n transformateurs en parallèle peut être tiré de ces deux expressions qui représentent respectivement les pertes totales de n-1 et de n transformateurs fonctionnant en régime parallèle:

$$P_{t_{n-1}} = \frac{(n-1)P_{cc}}{S_n^2} \left[ \frac{S_c}{n-1} \right]^2 + (n-1)P_v, W \quad (5.19)$$

$$P_{t_n} = \frac{nP_{cc}}{S_n^2} \left[ \frac{S_c}{n} \right]^2 + nP_v, W \quad (5.20)$$

De l'égalité des équations (5.19) et (5.20), nous avons pu ressortir le critère de charge économique justifiant le passage de n-1 à n transformateurs fonctionnant en régime parallèle et qui a la forme suivante :

$$S_{ce} = S_n \sqrt{\frac{n(n-1)P_v}{P_{cc}}}, \text{ KVA} \quad (5.21)$$

En utilisant le test suivant:

$$S_c > S_{ce}, \quad (5.22)$$

Si l'inégalité (5.22) est significative, le passage de n-1 à n transformateurs fonctionnant en régime parallèle recouvre bien les pertes totales de puissance dans le système de distribution de l'énergie électrique et plus clairement voir l'Algorithme d'optimisation des pertes de puissance Méthode Black box figure 5.3. ci-dessous

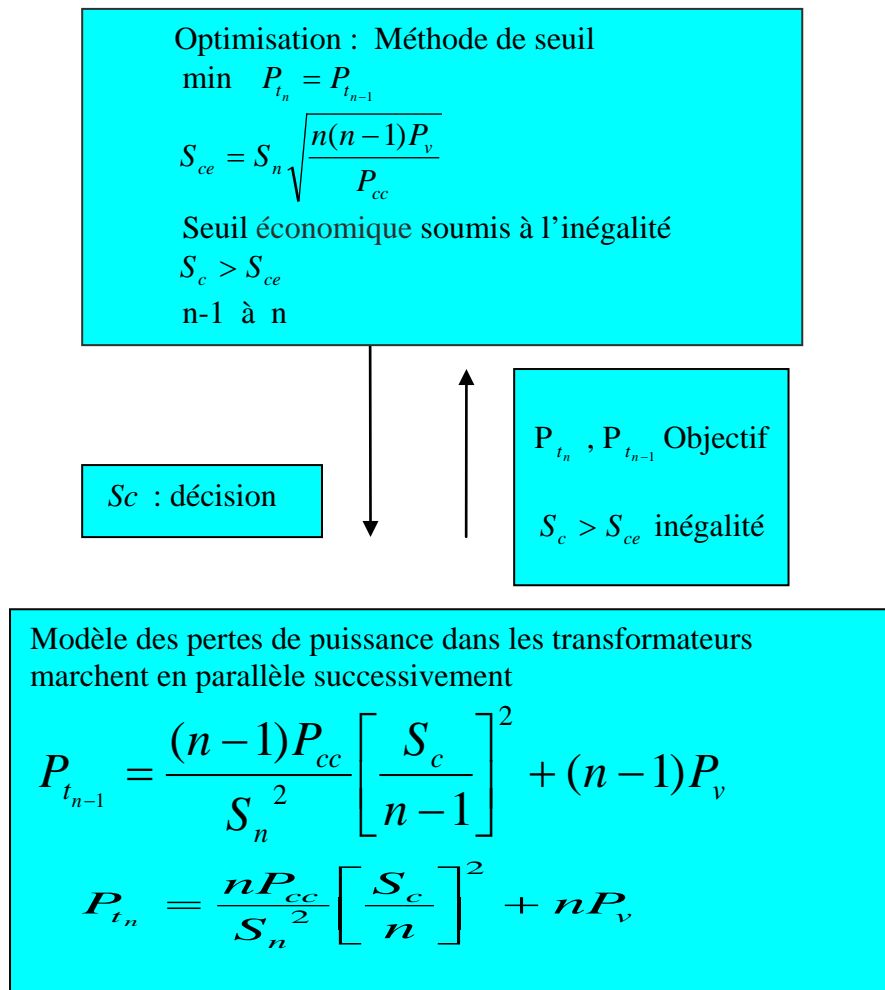


Figure5.3. Algorithme d'optimisation des pertes de puissance Méthode Black box

Etant donnée que le modèle des pertes de puissance du transformateur est constant, indépendant du régime de fonctionnement, dont sa forme générale dépend des pertes à vide et des pertes en charge. Donc, le choix de la méthode d'optimisation dans notre cas dépend exclusivement du régime de fonctionnement qui est variable et sa divergence de l'optimum entraîne des pertes d'énergie et non plus de la forme du modèle. D'ici découle que l'algorithme qui convient bien à la régie de l'optimisation des pertes de puissance indépendant de la forme du modèle et celui du Black box voir figure 5.3 ci-dessus.

Pour atteindre l'objectif de la recherche du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs identiques mis en service successivement, nous avons élaboré un programme informatique voir Annexe, qui permet d'obtenir simplement et rapidement les résultats suffisants pour situer le problème des pertes et de décider sur le passage de n-1 à n transformateurs.

### 5.2.1.5.Application

#### a) . Collecte des données relatives au problème du régime de fonctionnement

Par hypothèse, la sous station électrique alimentant le poste de concassage calcaire de la chaîne de fabrication du ciment est équipée par un seul transformateur de distribution d'électricité de puissance nominale ( $S_n = 1000$  KVA) dont les caractéristiques électriques sont regroupées dans le tableau 5.1.ci-contre. Ce dernier indique aussi les relevés de puissance, des charges électriques actives et réactives, consommées par les différents récepteurs. Cette sous station peut être considéré comme un point de recherche de l'économie d'énergie électrique pour l'entreprise envisagée

Tableau 5.1 : Caractéristiques techniques et d'exploitation du transformateur de la sous station de concassage calcaire

Marque U/primaire U/Second KV	Descriptions	Puissance nominale $S_n$ , KVA	Pertes à vides $P_v$ , W	Pertes de CC, $P_{cc}$ , W	Charges des récepteurs actives P, KW	Charges des récepteurs réactives Q, KVAR	Puissance apparente appelée par les récepteurs $S_c$ , KVA
OASA Savasienne 5.5/0.4KV	Transfo poste de concassage calcaire	1000	2124	6692	1180	250	1206.2

### A) Solution analytique

L'application de la relation (5.21) et (5.22) à notre exemple donnent les résultats de calcul du régime économique de fonctionnement des transformateurs identiques mis en service successivement et qui sont présentés dans le tableau 5.2.ci-dessous.

Tableau 5.2 : Résultats de calcul du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs envisagés mis en service successivement

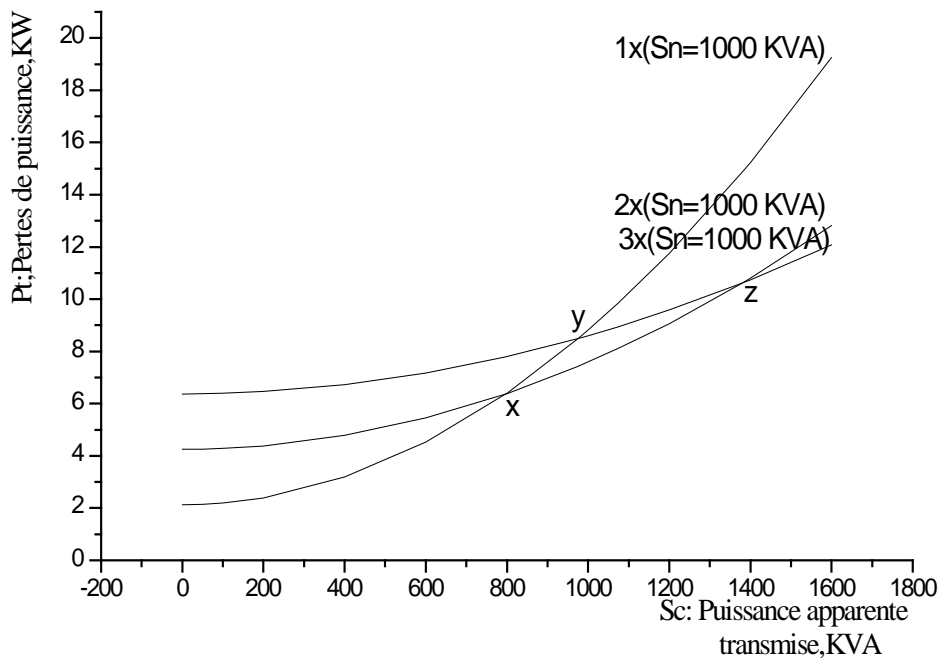
	Charges électriques transmises $S_c$ , KVA		
Régime de charge économique	Si $S_c < 796.7$	Si $796.7 \leq S_c < 1380$	Si $1380 \leq S_c$
Choix prioritaire	$U_n$ seul transfo de 1000 KVA mis en service est le plus rationnel	Deux transfos de 1000 KVA mis en service avec un régime parallèle sont les plus rationnels	Trois transfos de 1000 KVA mis en service avec un régime parallèle sont les plus rationnels

Les pertes et les économies d'énergie électrique réalisées au voisinage de la charge cible ( $S_c = 1206.2$  KVA) consommées par les récepteurs de la sous station électrique alimentant le poste de concassage calcaire, sont obtenues en utilisant la relation (5.20). Les résultats calculés sont indiqués dans le tableau. 5.3 ci-dessous.

Tableau 5.3 : Economie de puissance réalisée au voisinage de la charge cible

Charge cible $S_c = 1206.2$ KVA	
Un seul transformateur alimentant le poste de concassage calcaire de puissance $S_n = 1000$ KVA	Pertes de puissance $P_{t_1} = 11.86$ KW
Deux transformateurs fonctionnant en régime parallèle, sélectionnés par la méthode de seuil de puissance ( $S_n = 1000$ KVA)	Pertes de puissance $P_{t_2} = 9.12$ KW
Economie de puissance réalisée au voisinage de la charge cible est	$E_p = P_{t_1} - P_{t_2} = 2.74$ KW

## B) Solution graphique



Figure

5.4 : Relation de la variation des pertes de puissance en fonction de la puissance transmise de trois transformateurs identiques, mis en service successivement pour obtenir le minimum de perte



## C) Interprétation des résultats obtenus

De l'équation (5.21), nous avons pu ressortir les différents critères de la charge rationnelle, justifiant le passage de un à deux ( $S_{ce,1,2} = 796.7$  KVA) et de deux à trois ( $S_{ce,2,3} = 1380$  KVA) transformateurs fonctionnant en régime parallèle. En faisant le test, l'inégalité (5.22) est significative pour le passage à deux et non à trois transformateurs fonctionnant en régime parallèle. Donc, en remplaçant le critère ( $S_{ce,1,2} = 796.7$  KVA dans les équations (5.19) et (5.20) nous trouvons que les pertes électriques sont les mêmes ( $P_{t_1} = P_{t_2} = 6.37$  KW). Tandis que au voisinage de la charge appelée ( $S_c = 1206.2$  KVA), les pertes dans les deux transformateurs qui marchent en parallèle, égales et identiques au transformateur installé dans la sous station de concassage calcaire, de capacité nominale ( $S_n = 1000$  KVA), sont moins élevées. La différence représente le gain réalisé qui, d'après le tableau 3 et la solution graphique de la figure 4, est de l'ordre de  $E_p = 2.74$  KW.

### 5.2.1.6. Conclusion

Donc, pour la charge transmise ( $S_c = 1206.2$  KVA), le passage au régime de fonctionnement de deux transformateurs en parallèle au lieu d'un seul transformateur de puissance nominale ( $S_n = 1000$  KVA) est préférable pour deux raisons :

1) économie de puissance de l'ordre de  $E_p = 2.74$  KW. Cette puissance recouvre bien les investissements sur toute la durée de vie de fonctionnement des ces deux transformateurs en régime parallèle.

2) une réserve de puissance installée de l'ordre de 39.7% par rapport à la charge transmise et de 50% par rapport à la puissance nominale du transformateur existant ( $S_n = 1000$  KVA).

## 5.3. Economie de l'énergie active lors du passage de l'énergie réactive

Après avoir effectué le calcul de la puissance réactive globale à installer voir chapitre 4. formule 4.11 , nous pouvons procéder au choix de l'emplacement optimal des condensateurs et des types de batterie (fixe ou automatique) afin d'obtenir un retour d'investissement le plus court possible.

Nous déterminons d'abord la valeur de la puissance réactive et si possible la courbe de charge aux différents endroits susceptibles de recevoir des condensateurs. A partir de ces courbes, nous obtenons des renseignements sur les puissances réactives minimales,

moyennes et maximales appelées à ces différents endroits. D'ici découle, que le mode de compensation dépend de la valeur de la puissance réactive minimale consommée par l'installation comparée à la puissance globale à installer deux cas possibles à envisagés :

1) Cas où la puissance réactive minimale consommée par l'installation est supérieure à la puissance de compensation envisagée, alors, la compensation peut être globale car il n'y a pas de risque de surcompensation en fonctionnement normal, qui provoquerait des élévations anormales de la tension. Cependant, lors de l'arrêt de l'installation, nous déconnectons les condensateurs afin de ne pas provoquer de surtensions permanentes sur le réseau de distribution publique, dues à une surcompensation.

2) Cas où la puissance réactive minimale consommée par l'installation est inférieure à la puissance de compensation envisagée, alors, avec une compensation globale il y aurait une surcompensation qui provoquerait une élévation anormale de la tension. Par exemple, la surcompensation aux bornes d'un transformateur ne doit pas dépasser 15 % de sa puissance nominale. Pour éviter une surcompensation, nous pouvons :

- Installer une batterie en gradins avec régulation automatique qui permet d'épouser la courbe de charge

- Installer en tête d'installation une compensation égale à la puissance minimale consommée et compenser localement les récepteurs à forte consommation de puissance réactive, dans la mesure où la commande des condensateurs est asservie au récepteur

- Dans le cas d'une installation contenant plusieurs transformateurs HTA/BT, nous reportons une partie de la compensation d'un transformateur sur un autre transformateur.

### **5.3.1. critères de choix**

La compensation peut être :

- Effectuée en MT et/ou en BT ; il est plus économique d'installer des condensateurs moyenne tension pour des puissances supérieures à environ 800 KVAR.

- Globale, par secteur, individuelle.

- Effectuée par batterie fixe ou en gradins manoeuvrables automatiquement ;

Dans le cas où la batterie en gradins est choisie, nous préférons l'installation des gradins de puissances différentes afin d'obtenir un meilleur ajustement. Par exemple, avec des gradins de 800, 400, 200 et 100 KVAR nous pouvons obtenir toutes les puissances de 0 à 1 500 KVAR par pas de 100 KVAR.

Pour déterminer la solution optimale, nous devons prendre en compte les critères suivants:

- suppression des coûts d'énergie réactive (tarif) ;
- abaissement de la puissance souscrite (tarif) ;
- diminution des pertes Joule dans les conducteurs et dans les transformateurs ;
- tension régulière en tout point de l'installation ;
- coût d'investissement, d'installation et de maintenance de chaque solution.

### 5.3.2. Analyse du réseau de compensation

Le calcul de la compensation de l'énergie réactive dans les réseaux industriels de distribution se réduit à la détermination du taux de participation entre les batteries de compensation installées côté haute tension (BHC), batteries de compensation installées côté basse tension (BBC) et les moteurs synchrones (MS) dans la production de l'énergie réactive conditionnée par la valeur de puissance d'entrée ( $Q_e$ ) commandée par le système énergétique voir schéma de distribution de l'énergie réactive figure 5.5 et son schéma équivalent figure 5.4. ci-dessous

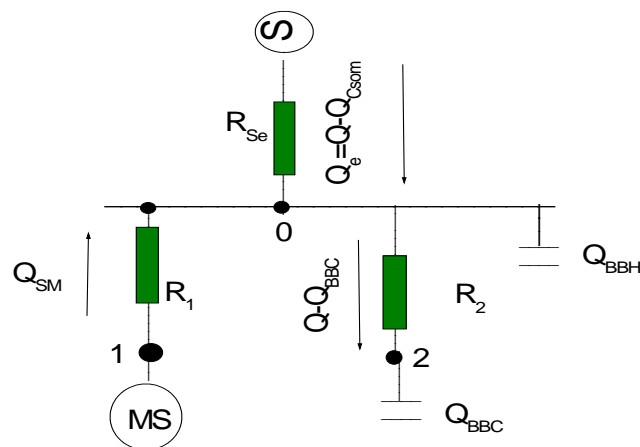


Figure 5.5. Schéma de distribution de l'énergie électrique avec différentes dispositions des moyens de compensation de l'énergie réactive

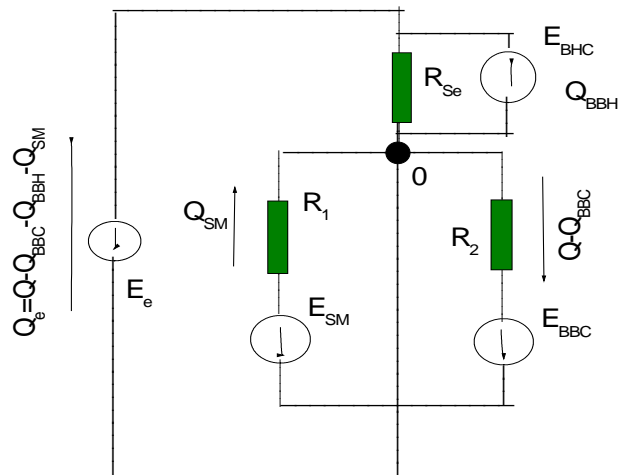


Figure 5.6. Schéma équivalent de calcul de l'énergie réactive et du potentiel économique

$$Q_{CSOM} = Q_{BHC} + Q_{BBC} + Q_{SM} = Q_C + \Delta Q - Q_e, \text{ KVAR} \quad (5.2.3)$$

Où :

- $Q_{CSOM}$  : Puissance réactive sommaire fournie par les moyens de compensation, KVAR ;
- $Q_{BHC}, Q_{BBC}$  : Puissance des batteries de condensateurs respectivement installées du côté haute et basse tension, KVAR ;
- $Q_{SM}$  : Puissance réactive fournie par les moteurs synchrones, KVAR ;
- $Q_e$  : Puissance de charge totale d'entrée, KVAR ;
- $Q_C$  : Puissance réactive calculée de l'installation, KVAR ;
- $\Delta Q$  : Pertes de puissance réactive, KVAR

Le modèle économique du système énergétique avec plusieurs interconnexions entre les nœuds de connexion a pour expression le polynôme quadratique suivant :

$$D_{ra} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} Q_i Q_j + \sum_{i=1}^n b_i Q_i + D_0, \quad \text{DA/an} \quad (5.24)$$

Où :

- $D_{ra}$  : Dépenses réduites annuelles sur le payement de l'énergie et sur les dispositifs de compensation, DA/an ;
- $n$  : Nombre de nœuds de connexion ;
- $a_{ij}, b_i$  : Coefficients d'approximation
- $D_0$  : Dépenses annuelles indépendamment de la charge réactive, DA/an

### 5.3.3. Analyse du réseau de compensation -Méthode de comparaison

En exprimant les dépenses par les puissances sommaires des dispositifs de compensation de la figure 5.5, nous obtenons la fonction à minimiser qui a une allure partiellement continue :

$$D_{ra} = C_0(Q_0 + d_p Q_{SM}^2) + D_0 m + D_{BHC} Q_{BHC} + D_{BBC} Q_{BBC} + C_0 \left[ \frac{R}{U_m^2} Q_{SM}^2 + (Q_C - Q_{BBC})^2 \frac{R_2}{U_B^2} \right] \quad (5.25)$$

Où :

- $C_0$  : Coût des pertes d'énergie,
- $Q_0$  : Pertes fixes qui dépendent du courant magnétisant à vide  $I_0$
- $d_p$  : Coefficient de pertes
- $D_0 m$  : Dépenses sur  $m$  batteries de condensateurs, déterminées comme le coût des appareils de commande ;
- $D_{BBC}, D_{BHC}$  : Dépenses unitaires respectivement des batteries de compensation installées du côté basse et haute tension.

Les dépenses spécifiques relatives à l'installation de compensation rapportées à l'unité de puissance réactive à compenser sont exprimées par la relation suivante :

$$D_{SI} = \frac{D}{Q_C}, DA / KVAr \quad (5.26)$$

Si la puissance réactive est facturée, alors, les dépenses spécifiques sont exprimées par :

$$D_{SF} = \frac{D_F}{Q_C}, DA / KVAe \quad (5.27)$$

Où :

$D_F$  : Coût de la puissance réactive facturé, DA

En utilisant le test suivant

$$D_{SI} < D_{SF} \quad (5.28)$$

Si l'inégalité (5.28) satisfaisante, nous procédons à la compensation

### **5.3.4. Analyse du circuit de compensation Méthode de potentiel économique**

#### **5.3.4.1. Recherche du Potentiel économique de l'installation de compensation par batterie de condensateur**

Le potentiel économique de l'installation de compensation par batteries de condensateur, peut être tiré de l'équation du minimum des dépenses réduites :

$$D_{\min} = D_{Pertes} - D_{IComp} = C_0 \Delta P_Q - D_{SC} Q_C \quad (5.29)$$

Où :

- $D_{Pertes}$  : Dépenses relatives aux pertes de puissance active provoquées par le passage de la puissance réactive, DA
- $D_{IComp}$  : Dépenses relatives aux investissements de l'installation de compensation, DA
- $D_{SC}$  : Dépenses spécifiques relatives aux batteries de condensateur, DA/KVAr
- $Q_C$  : Puissance totale des batteries de compensation, KVAr
- $\Delta P_Q$  : Pertes de puissance active provoquées par le passage de la puissance réactive, KW

Ces pertes sont exprimées par la formule suivante :

$$\Delta P_Q = \frac{RQ_C^2}{U^2} \quad (5.30)$$

Où :

- R : Résistance de la ligne ;
- U : Tension d'alimentation.

En remplaçant (5.30) dans (5.29) et en différenciant cette dernière expression par rapport à la variable  $Q_C$ , on obtient le vecteur dérivé des dépenses :

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial Q_C} = \frac{2C_0 R Q_C}{U^2} - D_{SC} \quad (5.31)$$

En annulant (5.31) et on tire l'expression du critère d'optimisation

$$Q_{COPT} = \frac{U^2 D_{SC}}{2C_0 R} \quad (5.32)$$

Dans cette dernière expression le terme  $\frac{U^2 D_{SC}}{2C_0}$  qui apparaît dans l'équation, représente le potentiel économique des dépenses réduites sur les batterie de compensation

### 5.3.4.2. Recherche du Potentiel économique de l'installation de compensation par moteur synchrone

Le potentiel économique de l'installation de compensation par moteur synchrone, peut être tiré de l'équation des pertes :

$$\Delta P_{QMS} = Q_0 + \frac{R_{eq}}{U^2} Q_C^2 \quad (5.33)$$

Où :

$R_{eq}$  : Résistance équivalente de la ligne et du moteur

En différenciant cette dernière par rapport à la variable  $Q_C$ , on obtient le vecteur dérivé des pertes :

$$\frac{\partial \Delta P_{QMS}}{\partial Q_C} = \frac{2R_{eq}}{U^2} Q_C \quad (5.34)$$

Mais au voisinage du régime nominal, le vecteur vitesse des pertes sera égal à une constante :

$$\frac{\partial \Delta P_{QSM}}{\partial Q_C} = \frac{\Delta P_{QNOM}}{Q_{CNOM}} = \frac{2R_{eq}}{U^2} Q_C \quad (5.35)$$

De la relation (5.35), nous tirons l'expression du critère d'optimisation

$$Q_{COPT} = \frac{U^2 \Delta P_{QNOM}}{2R_{eq} Q_{CNOM}} \quad (5.36)$$

Dans cette dernière expression le terme  $\frac{U^2 \Delta P_{QNOM}}{2Q_{CNOM}}$  qui apparaît dans l'équation, représente le potentiel économique des pertes réduites dans les moteurs synchrones



Les quantités de charge réactive générées par les différentes sources de compensation de la figure 5.6. satisfont les exigences de la loi de Kirchhoff au nœud (0) (charges entrantes égalent charges sortantes)

$$Q_e + Q_{SM} + Q_{BBH} = Q - Q_{BBC} \quad (5.37)$$

L'équation de la charge relative à la résistance  $R_2$  est comme suit :

$$Q - Q_{BBC} = \frac{E_{BBC} - E_{BBH}}{R_2} = \frac{(U^2 D_{SC})_{BBC} - (U^2 D_{SC})_{BBH}}{2C_0 R_2} \quad (5.38)$$

De l'égalité (5.38), nous pouvons tirer la charge réactive générée par la batterie de compensation installée du côté basse tension

$$Q_{BBC} = Q - \frac{(U^2 D_{SC})_{BBC} - (U^2 D_{SC})_{BBH}}{2C_0 R_2} \quad (5.39)$$

En appliquant la loi d'ohm, l'équation de la charge relative à la résistance  $R_1$  générée par le moteur synchrone est comme suit :

$$Q_{SM} = \frac{E_{BBH} - E_{SM}}{R_1} = \frac{1}{2R_1} \left[ \left( \frac{U^2 D_{SC}}{C_0} \right)_{BBH} - \left( \frac{U^2 \Delta P_{NOM}}{Q_{CNOM}} \right)_{SM} \right] \quad (5.40)$$

Par hypothèse, la puissance d'entrée normative est connue et peut être déterminée par l'équation suivante :

$$Q_{eNor} = P \tan \varphi_{nor} = 50\% P \quad (5.41)$$

Alors, la puissance réactive d'équilibre, générée par la batterie de compensation du côté haute tension et qui confirme la théorie des nœuds est :

$$Q_{BBH} = Q - Q_{BBC} - Q_{SM} - Q_{eNOR} \quad (5.42)$$

$$Q_{BBH} = P(\text{tg } \varphi_C - 0.5) - Q_{SM} - Q_{BBC} \quad (5.43)$$

L'exactitude de ces hypothèses sera déterminée par les résultat de l'analyse.

- 1) cas où la puissance réactive minimale consommée par l'installation est égale à la puissance de compensation envisagée

$$Q_{BBH} + Q_{BBC} + Q_{SM} = P(\text{tg } \varphi_C - 0.5) \quad (5.44)$$

Si l'égalité est satisfaisant, alors, la structure de compensation proposée est optimale et par conséquent les dépenses réduites sont minimales

- 2) cas où la puissance réactive minimale consommée par l'installation est supérieure à la puissance de compensation envisagée

$$P(\text{tg } \varphi_C - 0.5) > Q_{BBH} + Q_{BBC} + B_{SM} \quad (5.45)$$

Si l'inégalité est satisfaisante, alors, la structure de compensation proposée reçoit en plus une partie de la puissance réactive du réseau. Dont la valeur de l'énergie réactive qui dépasse la proportion de 50% d'énergie active, l'excédent est facturé à l'abonné selon les prix du tarif appliqué.

- 3) cas où la puissance réactive minimale consommée par l'installation est inférieure à la puissance de compensation envisagée

$$P(\text{tg } \varphi_C - 0.5) < Q_{BBH} + Q_{BBC} + B_{SM} \quad (5.46)$$

Si l'inégalité est satisfaisante, alors, la structure de compensation proposée renvoi une partie de la puissance réactive générée en plus au réseau. Dans ce cas l'énergie réactive non consommée en deçà de ces 50 % donne lieu à une bonification par KVARh égale au cinquième du prix du KVARh propre au tarif appliqué à l'abonné (tarif appliqué en Algérie).

### 5.3.5. Analyse du régime économique de compensation par la méthode graphique « compensation par fragment »

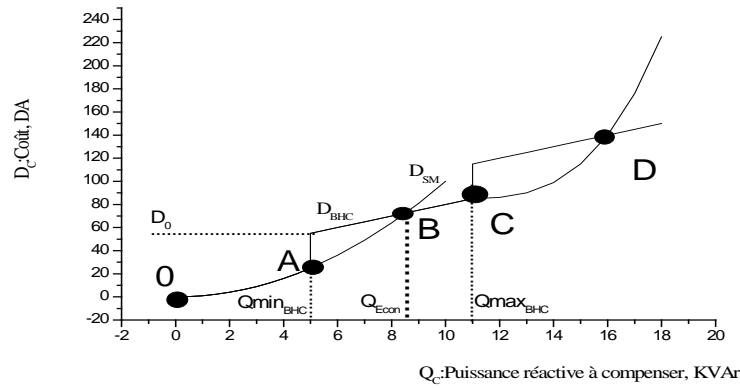


Figure 5.7. Régime économique des moyens de compensation de l'énergie réactive

En référant à la figure 5.7. ci-dessus, la courbe composée par des fragments linéaires et curvilignes O-A-B-C-D, représente les dépenses minimales réduites qui correspondent à la structure de compensation des charges réactives. Une méthode de calcul peut être élaborée de l'examen de cette courbe. Alors nous voyons que les dépenses pour les batteries de compensation commencent par un saut de valeur  $D_0$  au point A. Ce terme correspond à une charge fixe minimal indispensable générée par les batteries de compensation ce qui favorise le commencement de la compensation par les moteurs synchrones. Le point caractéristique B représente le seuil de rentabilité qui correspond à l'égalité des croisements des dépenses respectivement des batteries de condensateur et du moteur synchrone. Ce point représente la solution de l'équation différentielle des dépenses relatives aux moyens de compensation.

$$\frac{\partial D_{SM}}{\partial Q_{SM}} = \frac{\partial D_{BBH}}{\partial Q_{BBH}} = 0 \quad (5.47)$$

De cette équation on tire la charge optimal du critère d'optimisation

$$Q_{SMEcon} = Q_{BBCEcon} = Q_{Econ} \quad (5.48)$$

En utilisant le test suivant

$$Q_C < Q_{Econ} \quad (5.49)$$

Si la puissance réactive minimale consommée par l'installation est inférieure à la puissance du critère de choix économique, alors, la compensation par le moteur synchrone est préférable et recouvre bien les dépenses réduites et dans le cas contraire nous prenons la décision de mettre en place de la batterie de condensateur BBH, sa puissance doit croître jusqu'à la valeur nominale tout en maintenant la charge minimale fournie par les moteurs synchrones jusqu'au point (C).

Au point (C) ; nous rencontrons un nouveau saut des dépenses, alors la charge sera sur le moteur synchrone jusqu'à l'intersection avec une batterie de condensateur BBH au point (D).

En conclusion ; la courbe prend une allure cyclique sur un intervalle donné cela détermine la structure de la compensation de l'énergie réactive avec un comportement cyclique ayant l'allure d'une scie . Ainsi, la méthode graphique explique bien la régularité de la recherche et de l'analyse de la structure de la compensation, réalisée par les batteries de condensateurs BBH, BBC et le moteur synchrone MS .

#### **5.4. Etablissement de la caractéristique énergétique du concasseur type à marteau de la cimenterie de Ain- Touta** **Méthode $\Pi$ théorème**

En se référant au chapitre 3. Et grâce à la méthode de recherche théorique [16,23,70-74], on a pu ressortir la corrélation énergétique du concasseur type à marteau de la cimenterie de Ain Touta , afin de situer le problème de la consommation de l'énergie électrique de ce dernier.

On a arrêté les facteurs déterminant les pertes d'énergie non productifs et leurs causes par la méthode d'observation in –situ et qui sont présentés par l'équation suivante :

$$f(d_f, \Psi, g_f, D_G, Q_d, \zeta_r, T_{ORG}, V_0, V_V) = 0 \quad (5.50)$$

Où :

- $d_f$  : Diamètre du morceau après concassage, m
- $\Psi$  : Masse volumique,  $kg/m^3$
- $g_f$  : Accélération de la pesanteur ,  $m/s^2$

- $D_G$  :Diamètre du morceau maximale avant le concassage, m
- $Q_d$  : Débit de la matière, kg/s
- $\zeta_r$  : Propriété de la roche , kg/ms<sup>2</sup>
- $T_{ORG}$  : temps de percussions, s
- $V_0$  : Volume de la chambre, du concasseur, m<sup>3</sup>
- $V_V$  : quantité du vide de la chambre du concasseur, m<sup>3</sup>

Après traitement,la nouvelle équation fonctionnelle de la puissance consommée par l'installation de concassage, prend la forme suivante

$$W = Pav_{CON} + \frac{(1 - \frac{\alpha}{100})D_C \cdot \zeta_r \cdot Kt \cdot Q_d}{\sqrt{d_f \cdot g_f (1 - K_{RCC})}}, KWh, \quad (5.51)$$

Où :

- $\alpha$  : Représente le pourcentages des fines dans le tout venant, %
- $Kt$  : Rapport entre le temps de chute et le temps entre deux percussions
- $K_{RCC}$  : Coefficient de remplissage de la chambre de concassage
- $Pav_{CON}$  : Représente les pertes à vides du concasseur, KWh

La consommation spécifique déduite de la relation (5.51) est :

$$W_s = \frac{W}{Q_d}, \text{ KWh/Kg} \quad (5.52)$$

## Conclusion

L'équation fonctionnelle obtenue est complète et quelle présente tous les paramètres influençant la consommation d'énergie du concasseur. L'homogénéité de cette formule est vérifié en utilisant l'analyse dimensionnelle et que les paramètres auxquels, on a décidé de faire appel, sont justes. Définitivement , dont la mesure de la validité de cette caractéristique théorique dans la pratique, elle sera bien valable non seulement pour le concasseur de la cimenterie de Ain-touta mais, elle sera utile pour d'autres entreprises similaires. Grâce à cette relation on peut situer le problème et on peut régler le régime de fonctionnement au condition de la consommation optimale.

## Conclusions et propositions

Les travaux de recherches entrepris dans le cadre de la présente étude, ont permis d'aboutir à un certain nombre de conclusions :

### Chapitre 1.

Dans le chapitre 1, nous avons identifié les causes des pertes d'énergie pour l'ensemble du système électrique de la production à la distribution. Et pour faire face aux très nombreuses causes des pertes d'énergie électriques dans les entreprises industrielles, même si les phénomènes sous-jacents ne sont pas parfaitement compris, nous avons préféré le mode de classement des pertes adopté dans notre recherche selon les critères employés dont l'origine et l'enregistrement. Nous avons présenté des économies potentielles estimatives pour les mines ou les données de comparaison sont disponibles, en fonction d'une comparaison des sources, des coûts de l'énergie, des activités de concassage, des activités de broyage et entre autres activités de chacune avec ceux au coût et de consommation les plus faibles. Les comparaisons sont établies dans les cas de l'exploitation des carrières et mines à ciel ouvert entre différents pays. Par exemple l'Algérie et le Canada (tant des mines de fer, de phosphates et des matériaux de construction).

Signalons, toutefois, que la valeur des économies potentielles peut diverger de façon importante d'un même procédé de broyage appliqué dans différentes entreprises de ciment en raison de certains facteurs :

a) Facteurs pratiques et organisationnelles. Par exemple, les économies peuvent être liées au régime de charge du broyeur et à l'organisation du régime de fonctionnement lié aux horaires de broyage rentables tout en répondant à la demande prévue

b) Facteurs techniques. Ils existe des possibilités d'améliorer les installations à moindre coût et les installations les plus efficaces par la méthode de remplacement fondée par un calcul technico-économique calculée en faisant correspondre le coût de toutes les installations à celles qui affichent les coûts énergétiques moindres.

c) En vertu de l'analyse bibliographique sur les voies possibles de l'économie de l'énergie, nous sommes arrivés à la conclusion suivante :

Il faut être conscient du fait que non seulement les bases sont élaborées par les chercheurs en économie d'énergie électrique et en technologie mais aussi les équipements, les composants et les matériaux qui jouent un rôle capital dans l'activité technologique et industrielle du pays.

Dans le même temps d'ailleurs, les problèmes rencontrés couramment dans l'exploitation industrielle des techniques de l'économie par exemple constituent un fonds sur lequel s'appuient en permanence des programmes de recherche fondamentale.

Cependant, et malgré, que la majorité des entreprises de l'industrie des mines et des ciments Algériennes, actuellement, sont en phase d'exploitation. Alors, nous suggérons qu'il est utile de prendre les voies possibles de l'économie d'énergie électriques de l'étape d'élaboration du projet en considération durant la rénovation et l'extension éventuelle de ces

entreprises. Alors, dans ce cas là, on s'oriente vers le choix des paramètres rationnels des éléments du système.

Parmi les mesures prioritaires, en recourant aux mesures sans investissement et le recours au choix de la tarification optimale est une mesure confirmée. La valorisation des infrastructures passe en partie par la répartition efficace de leur coût. De plus, on exige souvent qu'une infrastructure se finance par la tarification, en totalité ou du moins en partie. Dans cette thèse, nous avons voulu montrer comment nous pouvons approcher cette question de la manière la plus efficace possible en fixant les prix de manière à se rapprocher le plus possible d'un optimum du tarif.

Par la méthode de différentiation partielle, nous avons obtenu un critère d'optimisation de la fonction structure de tarification appliquée en Algérie voir formule (1.45), qui joue un rôle très important dans la formule tarifaire et qui peut être considéré comme un indice économique. Ce critère représente l'accroissement de l'énergie réactive livrée gratuitement par le producteur d'électricité et l'énergie active consommée par le client à la forme suivante :  $Q = rE$ . En respectant ce critère, nous pouvons minimiser le tarif et sa meilleure forme qui conduit à un tarif optimal voir la relation (1.62). De plus, nous avons élaboré des graphiques à l'aide duquel nous pouvons procéder facilement et rapidement au choix du tarif économique respectivement de la série haute et moyenne tension les plus utilisées dans l'industrie Algérienne voir figures 1.24 et 1.25

En plus, pour trouver des solutions plus pratiques, il est bon maintenant de savoir comment choisir rapidement la tension rationnelle sans recours aux procédés faisant appel à des calculs plus ou moins longs et compliqués, et c'est pourquoi nous avons proposé en cette thèse un nomogramme voir figure 1.9. établi pour la première fois en fonction de certains nombres de paramètres jugés utiles (ayant déjà largement fait leurs preuves), qui sont : la tension rationnelle de la ligne ( $U_L$ , KV), la puissance à transporter ( $P_L$ , KW), l'impédance du réseau ( $Z$ ,  $K\Omega$ ) et la distance de transport ( $L_t$ , KM).

Un problème toujours posé dans l'industrie, qu'il s'agit du choix de l'emplacement des éléments électriques et de production. Et pour résoudre ce problème nous avons proposé une méthode basée sur une équation d'équilibre formulée pour la première fois à l'aide de la méthode de recherche théorique  $\Pi$  théorème et grâce à elle nous pouvons situer l'emplacement des éléments d'une façon optimale par exemple cas de l'emplacement de la sous station principale de distribution qui doit être déterminé de telle manière que les investissements et les frais d'exploitation spécifiques à la production à droite et à gauche de la sous station envisagée soient minimum.

## **Chapitre 2 :**

Dans le chapitre 2, nous avons présenté les indices relatifs à la consommation d'énergie électrique :

1) La première étape essentielle de l'étude de conception d'un réseau doit cerner les valeurs des puissances actives et réactives Car par exemple surdimensionné la puissance du transformateur entraîne un investissement excessif et des pertes à vide inutiles. Mais la réduction des pertes en charge peut être très importante. Sous dimensionné le transformateur

entraîne un fonctionnement quasi permanent à pleine charge et souvent en surcharge avec des conséquences en chaîne. Donc, d'ici découle que les méthodes de calcul du bilan électrique influencent grandement le transport de l'énergie électrique et par conséquent sur le choix optimal des éléments du réseau.

2 ) Parmi les principaux indices énergétiques, qui caractérisent le réseau électrique, nous avons étudié en détail les indices suivants et leurs rapports directs avec la consommation optimale d'énergie :

- Facteur de puissance ;
- Dépenses spécifiques d'énergie électrique;
- Degré d'approvisionnement en énergie du travail ;
- Minimum des dépenses réduites des installations
- Maximisation du rendement des installations électriques et de production ;

3) Dans cette thèse, nous avons jugé utile et nécessaire d'établir un modèle mathématique de la consommation d'électricité du broyeur cru en vue d'optimiser la consommation d'électricité. C'est l'un des objectifs visés pour réaliser des économies d'énergie .

a) Le modèle proposé est comparé à l'expérience de l'entreprise envisagée et est considéré comme satisfaisant

b) Grâce à ce modèle nous pouvons définir le régime économique d'exploitation du broyeur cru, en s'efforçant de stabiliser l'écoulement de la matière première au voisinage de la charge optimale (150 t/h), la consommation spécifique minimale d'énergie sera égale à 18.17 KWh/t

c) Toute divergence de la charge optimale dans les limites de 144 à 157 t/h entraîne une qualité inférieure du produit broyé qui nuise et interrompe les processus industriels postérieurs (usure rapide des éléments électriques et mécanique..) et par la suite un dommage financier à cause de l'accroissement de la consommation spécifique d'énergie de 0.25 à 0.54 KWh/t équivalent à une consommation de 36 à 85 KWh.

### **Chapitre 3.**

Dans le chapitre 3, nous avons pris comme critère d'optimisation le minimum de pertes d'énergie électrique aux conditions de la consommation optimale. Sur la base de ce critère nous avons formulé plusieurs modèles originaux relatifs aux installations électriques par exemple le modèle des pertes d'énergie des transformateurs identiques marche en parallèle successivement dans les conditions de recherche de la cimenterie de El-Ma-Labioud et pour trouver le régime rationnel de fonctionnement de ces transformateurs nous avons utilisé la méthode de Seuil. De plus nous avons formulé le modèle de la structure optimale de la compensation de l'énergie réactive à l'intention de la diminution des pertes actives entre différents niveaux de tension et différents moyens de compensation par les méthodes de comparaison, de potentiel économique et recherche graphique sur le régime économique compensation par fragment et d'autres modèles de la consommation de l'énergie électrique



des installations technologiques de concassage par la méthode de  $\Pi$  théorème et de broyage par voie de recherche passive méthode de régression pour le but d'organiser la consommation et de diminuer les pertes dans les conditions de recherche de la cimenterie de Ain-Touta.

#### **Chapitre 4.**

Dans le chapitre 4, nous avons présenté parmi les mesures techniques technologiques et organisationnelles de la régularisation de la consommation de l'énergie électrique :

1) L'application de la compensation de l'énergie réactive à l'intention de la diminution des pertes actives en recourant aux méthodes suivantes :

- Méthode basée sur l'abaissement de la puissance souscrite en tarif
- Méthode basée sur la suppression des coûts d'énergie réactive en tarif

2) l'Expertise des possibilités de mise en pratique des mesures recommandées pour l'amélioration de l'efficacité énergétiques des entreprises cas des cimenteries

3) Choix du régime économique des transformateurs en marche parallèle et nous avons recommandé les transformateurs à haute efficacité qui peuvent représenter un important avantage pour les sociétés industrielles, ainsi que pour l'ensemble de l'économie et pour l'environnement.

4) l'optimisation de l'option du système tarifaire pour une structure de consommation donnée, le client choisit l'option qui minimise sa facture.

#### **Chapitre 5.**

Dans le chapitre 5, nous avons présenté des applications faisables sur la recherche de l'économie de l'énergie électrique aux conditions de la consommation optimale.

1) Parmi les possibilités de l'économie d'énergie aux conditions de la consommation optimale, la section d'un conducteur joue un rôle très important. Par la méthode d'optimisation des dépenses d'investissement et des frais d'exploitation, nous avons pu ressortir le critère économique du choix de la section du conducteur. Et pour diminuer les pertes dans les lignes, nous avons examiné d'autres possibilités en agissant de la manière suivante c'est à dire :

- 1) En augmentant la tension du réseau nous pouvons diminuer les pertes
- 2) En diminuant les pertes actives inutiles, nous pouvons diminuer les pertes
- 3) En augmentant le facteur de puissance nous pouvons diminuer les pertes

En plus , nous avons réussi de présenter la dépendance graphique des pertes par effet joules en fonction du facteur de puissance et du facteur de charge de la ligne de transport reliant la cimenterie de El-Ma-Labiod au poste de distribution de El-Hammamet plus clairement voir figure 5.2.

2) En appliquant la méthode de seuil pour le cas de la sous station de distribution de la cimenterie de El-Ma-Labioud et pour une charge transmise ( $S_c = 1206.2$  KVA), le passage au régime de fonctionnement de deux transformateurs en parallèle au lieu d'un seul transformateur de puissance nominale ( $S_N = 1000$  KVA) est préférable pour deux raisons :

a) nous pouvons économiser une quantité de puissance de l'ordre de  $E_p = 2.74$  KW. Cette puissance recouvre bien les investissements sur toute la durée de vie de fonctionnement des ces deux transformateurs en régime parallèle.

b) nous pouvons assurer une réserve de puissance installée de l'ordre de 39.7% par rapport à la charge transmise et de 50% par rapport à la puissance nominale du transformateur existant ( $S_N = 1000$  KVA).

c) nous avons élaboré un programme informatique pour la recherche du régime rationnel de fonctionnement de transformateurs marche en parallèle, voir annexe A

3) Pour arriver à une solution optimale et afin de diminuer les pertes actives lors du passage des puissances réactives, nous avons proposé une structure de compensation originale de comportement cyclique ayant l'allure d'une scie. Ainsi, la méthode graphique figure 5.7. sur la recherche du régime économique de compensation par la méthode compensation par fragment explique bien la régularité de la recherche et de l'analyse de la structure de la compensation, réalisée par les batteries de condensateurs BBH, BBC et le moteur synchrone MS.

## Conclusion générale

Le but essentiel de cette thèse est de minimiser les pertes des transformateurs et des installations de broyage afin d'économiser de l'énergie électrique et d'optimiser les coûts de l'énergie :

1) Pour le cas des transformateurs, nous avons proposé une solution originale et faisable, c'est de rechercher le seuil du régime économique en minimisant les pertes de transformateurs de la cimenterie de El-Ma-Labioud, existants pouvant fonctionner en parallèle adaptés au type de charge en utilisant la méthode de seuil. Nous avons confirmé pour une charge transmise ( $S_c = 1206.2$  KVA), le passage au régime de fonctionnement de deux transformateurs en parallèle au lieu d'un seul transformateur de puissance nominale ( $S_N = 1000$  KVA) est préférable pour deux raisons :

a) nous pouvons économiser une quantité de puissance de l'ordre de  $E_p = 2.74$  KW. Cette puissance recouvre bien les investissements sur toute la durée de vie de fonctionnement des ces deux transformateurs en régime parallèle.

b) nous pouvons assurer une réserve de puissance installée de l'ordre de 39.7% par rapport à la charge transmise et de 50% par rapport à la puissance nominale du transformateur existant ( $S_N = 1000$  KVA).

2) Nous avons jugé utile et nécessaire d'établir un modèle mathématique de la consommation de l'énergie électrique du broyeur cru de la cimenterie de Ain-touta, en vue d'optimiser la consommation spécifique d'électricité. Le modèle proposé est comparé à l'expérience de l'entreprise envisagée par la méthode d'expérience passive et de régression. En s'efforçant de stabiliser l'écoulement de la matière première au voisinage de la charge optimale (150 t/h), une consommation spécifique d'énergie minimale sera de l'ordre (18.17 KWh/t) . Toute divergence de la valeur cible (144 à 157 t/h) accroisse la consommation spécifique de ( 0.25 à 0.54 KWh/t) équivalent à une consommation de 36 à 85 KWh.

3) nous avons procédé par plusieurs méthodes de recherche afin d'optimiser la consommation et de réduire les coûts directs consommation et indirects pertes de production de l'énergie électrique. Or, le coût direct de l'énergie dépend :

- Du nombre de kWh consommés
- De la puissance appelée (kW) en fonction du calendrier, du type de contrat et de la puissance souscrite
- De la puissance réactive consommée (kVARh)

Des réductions peuvent être facilement initiées en agissant sur deux facteurs : le niveau de consommation et l'offre tarifaire du distributeur.

A cette fin, une connaissance approfondie des besoins est indispensable. Un système de mesure global fournira les données nécessaires pour enregistrer et analyser la situation. De plus, un système avec des fonctions automatiques de délestage permettra à l'entreprise final d'optimiser sa consommation en fonction de la grille tarifaire.

## **Annexe .Elaboration d'un programme informatique de la recherche du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs – méthode de Seuil**

```
Program RRRFT ; /* recherche du régime rationnel de fonctionnement des transformateurs -  
méthode de Seuil */
```

```
Const Sn = 1000 ; /* Sn : puissance nominal du transformateur */
```

```
Pv = 2.124 ; /* Pv : Pertes à vide */
```

```
Pcc = 6.692 ; /* Pcc : Pertes de court circuit */
```

```
Sc = 1206.2 ; /* Puissance transmise */
```

```
Var i : integer ;
```

```
Sc : real ; /* Seuil de puissance économique */
```

```
Begin
```

```
  i := 1 ;
```

```
  Repeat
```

```
    i := i + 1 ;
```

```
    Sce := Sn*sqrt(i*(i-1)*(Pv/Pcc))
```

```
  Until (Sce > Sc) ;
```

```
  Write (“si  $Sce \leq Sc$  , “ le nombre “ , i , ” de transformateurs mis en service avec un régime  
parallèle sont les plus économiques, sinon le nombre ; i - 1 ; ” de transformateurs fonctionnent  
en parallèle sse sont les plus économique”) ;
```

```
End.
```

## Bibliographie

- [1] W.Théodore, Electrotechnique, Ed, Eyrolles, Paris, 1979
- [2] Guide de conception des réseaux électriques, Stabilité dynamique des réseaux industriels, Publication Schneider electric.
- [3] E. Benessahraoui, Le control des pertes non techniques d'électricité, publication IEPF , 2002
- [4] Département de l'énergie, 1982. Energy efficiency : Optimization of electric power distribution system losses. Document no 6, Washington D.C., Banque mondiale.
- [5] Électricité de France, 1996. La réduction des pertes non techniques dans les systèmes électriques de distribution. Management stories no 15.
- [6] Persoz H., Santucci G., Lemoine J.-C., Sapet P., 1984. La planification des réseaux électriques. Édition Eyrolles, Paris
- [7] Guide de conception des réseaux électriques industriels, Méthodologie de conception d'un réseau électrique, Publication Schneider electric
- [8] Rapport de la consommation d'énergie , Cimenterie de Ain-Touta,2006
- [9] Rapport de la consommation d'énergie , Cimenterie de El-Ma-Labiod,2007
- [10]Rapport de la consommation d'énergie , Cimenterie de Hamma-Bouziane,2006
- [11]Analyse comparative de la consommation d'énergie des mines souterraines toutes teneurs du Canada ISBN 0-662-79189-4 No de cat. M144-71/2005F
- [12]Analyse comparative de la consommation d'énergie des mines à ciel ouvert du Canada ISBN 0-662-79188-6 No de cat. M144-70/2005F
- [13] E.Benessahraoui, 'Le diagnostic énergétique d'une cimenterie', I.E.P.F, (A.I.F),2001 [WWW.iepf.org](http://WWW.iepf.org)
- [14] J.Cherdarchuk, S.Lalani, K.Mik, T.Sim, Des horaires de broyage rentables et fiables pour Inland Cement', Université d'Alberta, SCRO Edmonton,2000
- [15] Guide de planification et de gestion de l'efficacité énergétique ISBN n° M92-239/2001f, Canada, 2002
- [16] M. Kara, Déduction de la caractéristique énergétique du concasseur type à marteau dans les conditions de la cimenterie de Ain-Touta, Algérie, Thèse de Magistère en Electromécanique Minière, Centre Universitaire de Tébessa, Algérie, 1992
- [17] B. CHETATE, C. KARA, G.TCHEREMTCHKO, I. MERAZKA, 'Développement du système expert industriel et son application pour le choix rationnel des installations de concassage et de broyage d'une cimenterie', Revue Internationale des Technologies Avancées n°10 – Septembre 1998, pp1-5
- [18] M. Kara, A. Haddouche, Importance de l'entraînement à vitesse variable sur l'économie d'énergie électrique. Application au système Ventilateur-broyeur cru de la cimenterie de El-Ma-Labiod, Algérie. Comm.Sém.Inter sur les systèmes électromécaniques, Université d'Annaba Algérie 22-23 Nov.2005
- [19] JUNG O., Développement et expérience acquise en exploitation avec les broyeurs à galets dans l'industrie cimentière), ZKG international ISSN 0722 4397 Allemagne , 1999, vol. 52, n°8, pp. 452-458
- [20] E.Pichlmaier, Modernisation d'un atelier de broyage , Cim bétons plâtres chaux ISSN 0397-006X CODEN CBPCDD, Ed Septima, Paris, 2000,n°2,pp100-106
- [21] Cement\_Industrialit\_Optimizeit\_Expert\_Optimizer\_FRA,ABB,Suisse,SA , [WWW.abb.com/cement](http://WWW.abb.com/cement)
- [22] HODOUIN Daniel ; DEL VILLAR René,' Conduite des unités de broyage, Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés ISSN 1762-8725 , Paris, 1994, vol. 3J3110, pp. J3110.1-J3110.26
- [23] E.C.Blanc, Tome1,2,3.Technologie des appareils de fragmentation et de classement

- dimensionnel ,A.N.R.T. Ed, Eyrolles, Paris, 1974
- [24] L. Manescu, M. Ciontu, N. Hadjsaid, J. Sabonnadière, La traçabilité de l'énergie dans les réseaux électriques partie 1.Méthodes des images des charges, Revue R.I.G.E,vol6/3-4 (2003)pp.265-286.
- [25] B. CHETATE, T. KHALDI, B. BOUDJENAH, C. KARA, « Elaboration d'un système de C.A.O permettant le choix de la puissance des moteurs électriques », Revue Internationale des Technologies Avancées, n° 8, Décembre 1995, pp. 39-52
- [26] S.VIVIER, M.HECQUET, P.BROCHET, Optimisation de dispositifs électrotechniques par la méthode des plans d'expériences Article vol 8/5-6 - 2005 VOL 8/5-6 - 2005 – pp.725-747
- [27] R. Ranjan, B. Venkatesh, D. Das, Optimal conductor selection of radial distribution networks using fuzzy adaptation of evolutionary programming, Journal I.J.P.E.S 203.3.3444(2006)
- [28] R. Caire, N. Retiere, N. Hadjsaid, Coordination optimale des moyens de réglage pour les réseaux de distribution en présence de production décentralisée, Revue, R.I.G.E, vol6/2-3 (2006)pp.161-184.
- [29] L. Manescu, M. Ciontu, N. Hadjsaid, J. Sabonnadière, La traçabilité de l'énergie dans les réseaux électriques partie 1.Méthodes des images des charges, Revue R.I.G.E,vol6/3-4 (2003)pp.265-286.
- [30] J. Jewekes, D. Sawers, R. Stillerman,'L'invention dans l'industrie de la recherche à l'exploitation',Ed Organisation, Paris 1966
- [31] F. Viallet, 'Statistique et recherche appliquée', Ed Chotard et associés, Paris 1970
- [32] W. Baumol, Théorie économique et analyse opérationnelle, Paris, Dunod, 1961
- [33] I. N. Bronstein , K. A. Semendiaev, Aide mémoire de mathématiques à l'usage des ingénieurs et des élèves des grandes écoles, Ed Eyrolles, Paris, 1985
- [34] J. Brissard, M. Pollizzi, Gérer la production industrielle Outils et méthodes, Ed Mare Nostrum, 1996
- [35] P. Vizzavona, Gestion financière et analyse prévisionnelle, Alger, Ed Berti, 1993
- [36] G. Mentha, Les tests statistiques au service des affaires, Ed Hommes et technique, Seine,1961
- [37] J.J.Droesbek, J.Fine, 'Plans d'expérience applications à l'entreprise', Ed Technip, Paris, 1997
- [38] Mines Zinc et Plomb, Potentialités minières // htm
- [39] Mines Zinc et Plomb, 1<sup>ère</sup> Conférence International en Algérie sur les ressources minières 2007
- [40] Guide de planification et de gestion de l'efficacité énergétique ISBN n° M92-239/2001f, Canada, (2002).
- [41] SONELGAZ , Système de tarification hautes et moyennes tension, Algérie 2007
- [42] Bilan prévisionnel de l'équilibre offre demande d'électricité en France édition 2005 WWW.rte.France.com
- [43] CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques) : An International Survey of the present Status and the Perspective of Expert Systems on Power System Analysis and Techniques. Task Force 07 of Working Group O2 of Study Committee 35 (Power System Analysis **and**
- [44] <http://www.legifrance.gouv.fr> Achats des pertes – 22/10/2004 EDF Réseau Distribution Techniques). Electra No 123
- [45] NADEL Steven - 2003 - « Appliance & Equipment Efficiency Standards in U.S. Accomplishments, Next Steps and Lessons Learned » - Communication au colloque de « European Council for an Energy Efficient Economy »
- [46] Règlements d'application des tarifs, service industriel de Genève 2006

- [47] Charles A. Carrier1 Hausse des tarifs d'électricité au Québec Document CPP 2004
- [48]N.U.S. Consulting Group, Etude international sur le prix de l'électricité, Avril 2006
- [49] E.D.F. Système de tarification.2006
- [50] E.D.F Réseau de distribution, Achat des pertes <http://www.legifrance.gouv.fr>
- [51]CREG Programme indicatif des besoins en moyens de production d'électricité 2006-2015 . [WWW.mem-algeria.org](http://WWW.mem-algeria.org)
- [52]Belyi .M, Riabenko.I, et Syrovatko.A, Electrotechnique minière, Université d'Annaba Algérie, N°34 1978
- [53] Schneider Electric – Principaux paramètres d'un transformateur, Catalogue distribution électrique 2002
- [54]Lebov .R ,Electrification des travaux du fond en russe, Moscou (1974)
- [55] Volotkovskiy.S.A, Electrification des travaux miniers à ciel ouvert en russe, Moscou 1974
- [56] Mekheev .V, Faibissovitsh.I, Electricien Ajusteur de mine , Moscou, 1968
- [57] E. ROBLOT \*, P. GROSSEAU \*, B. GUILHOT \*, B. CLASSEN \*\*, C. HAEHNEL,Etude du mode d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker CNRS 5148, Ecole des Mines de Saint Etienne 2002, pp 58-64
- [58] Principes de base pour l'exploitation optimale des installations complexes J.-M. Chuard, Enerconom Berne, décembre 2002 AG, Bern
- [59] C. Guilbert, "Calcul et réalisation des transformateurs", Paris, Radio, (1963).
- [60] A. Fouillé, "Electrotechnique à l'usage des Ingénieurs", Paris, Dunod, (1969).
- [61] O.Deblecker, J.Lobry, C.Broche, Introduction du modèle de Preisach vectoriel et d'un modèle de pertes classiques en magnétodynamique 2D. Application au calcul des pertes fer d'un transformateur triphasé à vide., R.I.G.E,vol6/3-4 (2003)485-517.
- [62] H.Buyse, ELECT2753, "Transport d'énergie Életrique", Université Catholique de Louvain, (2004).
- [63] L.Manescu, M.Ciontu, N.Hadjsaid, I.Sabonnadière,La traçabilité de l'énergie dans les réseaux électriques partie 1. Méthode des images des charges., R.I.G.E, vol 6/3-4(2003) 265-286.
- [64]B. Hochart, "Le transformateur de puissance", Paris, Lavoisier, (1988).
- [65] Catalogue, "Distribution électrique", Schneider électrique, (2002).
- [66] Nicolas D, Méthodes d'optimisation combinatoire pour des problèmes de graphes, Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique fédérale de lausanne, 1996
- [67] Cherkaoui S, Configuration optimale d'un réseau électrique de distribution, thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de lausanne, 1992
- [68] Razanamampandry.j , Système pour l'optimisation des tensions et des puissances réactives d'un réseau de transport d'énergie électrique, thèse de doctorat , Ecole polytechnique fédérale de lausanne, 1995
- [69] Fetha.C, Analyse et amélioration de l'indice de la non symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique, Thèse de Doctorat d'état Université de Batna, 2006
- [70] Ranald V., *Mécanique des fluides et hydraulique cours et pratique*, Série schaum,1994
- [71]Leontiev A.,*Théorie des échanges de chaleur et de masse*, Moscou, Mir,1979
- [72]Tchernov A., Bessrebrennikov N., *Les fondements de la thermique et de hydraulique*,Moscou, Mir, 1971
- [73] Anistratov.V, Planification mathématique des expériences technologiques, Ed, Université d'Annaba, 1974



- [74] Semendiaev.K.A, Formules empiriques, Ed d'état, GTTI, Moscou, 1933
- [75] Kafarov.V, Méthodes cybernétiques et technologie "méthodes d'optimisation", Ed, Mir Moscou, 1974
- [76] IEPF. Les entreprises de services éconergétiques. Cahier prisme n° 6 , 2001
- [77] IEPF. Les projets en efficacité énergétique et leurs possibilités de financement. Cahier Prisme n° 7, 1997.
- [78] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie (pour la Commission européenne, Direction générale de l'Énergie – DG XVII). Le Financement des équipements liés à l'énergie – Guide pratique à l'usage des PME – PMI. Paris, Juin 1995.
- [79] IEPF. Les moteurs efficaces. Cahier prisme n° 3 , 2002
- [80] Daniel H. Dederer, Association canadienne de l'électricité, 1991. Les applications de l'électricité : Les moteurs électriques.
- [81] Hydro-Québec, 1993. Guide technique – Entraînements à vitesse variable – Programmes d'initiatives et d'analyses énergétiques, Systèmes de pompage, de ventilation et de compression.
- [82] IEPF. Les transformateurs de distribution efficace, . Cahier prisme n° 9 , 2005
- [83] Deschamps. L, Prospective 2100, transport de l'énergie électrique : des techniques pour Demain, paris 2004