

# EFFICACITE ENERGETIQUE DES INSTALLATIONS ELECTRIQUES INDUSTRIELLES

Kamel CHERIF<sup>1</sup>, Abderahmen SELLAMI<sup>2</sup>

*Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Radès, Direction Générale des Etudes Technologiques, rue El Kods -  
Radès ville - Tunis*

<sup>1</sup>Kam.cherif@yahoo.fr

<sup>2</sup>sellamiabd02@gmail.com

**Résumé—** En milieu industriel, l'amélioration de l'efficacité énergétique se traduit par une baisse de la consommation d'énergie, principalement obtenue grâce au déploiement de batteries de condensateurs dans les circuits électriques, objectif de ce travail de recherche. Afin de générer l'énergie réactive au près des charges et de ne pas la prélever sur le réseau électrique de distribution, l'installation des batteries de condensateurs dans une installation électrique accroît la puissance disponible au secondaire du transformateur alimentant l'installation, réduit les chutes de tension sur les câbles amont et diminue le courant acheminé en aval du disjoncteur BT, entraînant une baisse des pertes joules dans les conducteurs.

**Mots-clés—** Installation électrique, Compensation, énergie réactive, facteur de puissance, batterie de condensateur.

## I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, les industries, grandes consommatrices d'énergie, sont confrontées à la hausse des coûts énergétiques, aux exigences réglementaires et à la nécessité de réduire leur empreinte carbone [1-2]. Dans ce contexte, optimiser l'utilisation de l'électricité devient une priorité stratégique [3].

Selon Bera M. et al. [4], les cadres internationaux notamment l'accord de Paris et les ODD «objectifs de développement durable» ont catalysé l'amélioration de l'efficacité énergétique dans plusieurs secteurs. Ce concept est confirmé par Zaghoud, O. [5]. Il a évalué que l'augmentation de l'efficacité énergétique nécessite que le progrès technologique croît plus vite que la productivité globale des facteurs [5]. L'efficacité énergétique est conditionnée par un rythme de progrès technologique devant dépasser les gains de productivité du capital [5]. Wang, J. et al. Confirme que la notion de l'efficacité énergétique renvoie à une baisse de la consommation d'énergie électrique résultant principalement d'innovations technologiques, plutôt que de changements comportementaux [6-7].

Dans l'industrie, l'une des composantes de la puissance électrique générée par les charges inductives (moteurs, transformateurs, etc.) est la puissance réactive. La circulation d'énergie réactive dans les réseaux électriques de distribution accroît le courant, provoquant des surcharges des transformateurs, pertes énergétiques, échauffement des câbles, et chutes de tension significatives. Dans ce contexte, notre recherche analyse la nécessité de générer l'énergie réactive localement aux charges électriques pour limiter son soutirage au réseau de distribution [8-9].

Afin de compenser l'énergie réactive, cette recherche analyse le déploiement de batteries de condensateurs, générant ainsi des économies sur les factures d'électricité et optimisant les performances des installations électriques.

## II. FORMES D'ENERGIE FOURNIES PAR UN RESEAU ELECTRIQUE

Dans les réseaux à courant alternatif, deux formes d'énergie sont distinguées :

- L'énergie active ( mesurée en watts ) : cette énergie est responsable de la conversion utile en travaux mécaniques, chaleur ou lumière, correspondant à la puissance réellement consommée par les charges résistives.

- L'énergie réactive ( mesurée en VAR ) : cette énergie est associée aux champs électromagnétiques des équipements inductifs, notamment les moteurs et les transformateurs, et aux champs électrostatiques des éléments capacitifs. Elle oscille entre la source et ces charges sans produire de travail utile, servant essentiellement à magnétiser les circuits.

Un excès d'énergie réactive génère des conséquences néfastes notamment :

- L'augmentation des pertes joules (effet thermique) dans les conducteurs,
- Surdimensionnement des équipements (câbles, transformateurs),
- Des chutes de tension accentuées,
- La diminution de la capacité de transport active du réseau.

Pour compenser localement ces besoins réactifs, des batteries de condensateurs sont installées en parallèle des charges inductives. Ces dispositifs fournissent l'énergie réactive requise directement au point de consommation, selon le principe d'échange d'énergie réactive capacitive vs inductive. Cette compensation permet de :

- Réduire le flux réactif sur le réseau amont ,
- Améliore le facteur de puissance ,
- Stabiliser la tension locale ,
- Libère de la capacité pour l'énergie active.

### III. COMPENSATION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

#### A. Principe

Pour le cas des gros consommateurs d'énergie électrique, pendant certaines périodes, au-delà d'un seuil, l'énergie réactive consommée sera facturée. Pour les autres consommateurs, une prime fixe dépendant de la puissance souscrite apparente sera facturée par le distributeur et au-delà de cette puissance des pénalités seront payées par le consommateur. La compensation d'énergie réactive consiste à réduire cette prime fixe en diminuant la puissance souscrite apparente.

La compensation de l'énergie réactive concerne l'utilisation de batteries de condensateurs pour améliorer l'efficacité énergétique des installations électriques, en particulier en réduisant les pertes liées à l'énergie réactive. Ces batteries permettent de garder un facteur de puissance proche de l'unité, évitant ainsi les pénalités liées à la sur-consommation de l'énergie réactive et optimisant la capacité du réseau.

- La compensation de l'énergie électrique consiste à utiliser des techniques et des équipements pour minimiser les pertes d'énergie réactive dans les réseaux électriques.

- Les systèmes de compensation incluent des batteries de condensateurs et d'autres dispositifs pour avoir un facteur de puissance amélioré et diminuer ainsi les pertes.

L'objectif poursuivi est triple : optimiser l'utilisation de l'énergie électrique, alléger la charge sur les réseaux et réduire les coûts opérationnels.

#### B. Cas d'étude d'une installation industrielle

Les pertes électriques industrielles sont un enjeu majeur, et des solutions de compensation sont mises en place pour réduire leur impact sur la production et la consommation. Dans ce contexte, pour une installation donnée, figure 1, dont l'objectif est de ramener son facteur de puissance  $\cos \varphi$  de 0,75 à 0,93 par une batterie de condensateurs, nous devons déterminer la quantité d'énergie réactive nécessaire aux équipements et en maintenant un facteur de puissance élevé.

Pour déterminer la capacité des condensateurs à installer, nous avons travaillé sur une installation industrielle schématisée par la figure 1.

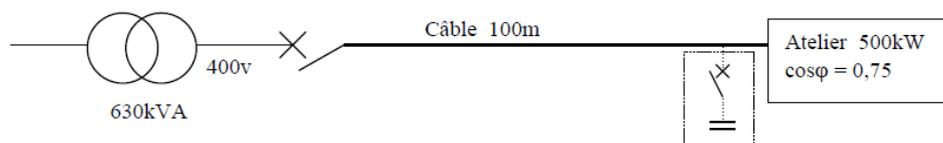


Figure 1 Schéma de l'installation industrielle étudiée

Afin d'évaluer l'intérêt de l'amélioration du facteur de puissance de cette installation, nous devons déterminer:  
 - La puissance apparente du transformateur :

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (1)$$

- Le courant en ligne, exprimé par :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (2)$$

- Les pertes en ligne, données par l'expression (3) :

$$P_j = 3RI^2 \quad (3)$$

Sachant que

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (4)$$

$\rho = 22.5m\Omega \cdot mm^2/m$  pour le cas du cuivre ,

$\rho = 36m\Omega \cdot mm^2/m$  pour l'aluminium .

- La puissance de la batterie de condensateurs est exprimée par (5) :

$$Q_c = Q - Q' \quad (5)$$

où

$$Q = P \cdot \tan \varphi \quad (6)$$

$$Q = P \cdot \tan \varphi' \quad (7)$$

- La capacité des condensateurs, exprimée par :

$$C = \frac{Q_c}{3U^2w} \quad (8)$$

- Le courant de ligne donné par l'expression (7) :

$$I_n = \frac{Q_c}{\sqrt{3}U} \quad (9)$$

- Le réglage de la protection thermique est donné par l'expression (9) :

$$I_r = k * I_n \quad (10)$$

où

k est un facteur qui dépend du type des équipements.

#### IV. CHOIX DU MODE DE COMPENSATION

En pratique, on distingue différentes possibilités de modes de compensation qui sont réalisables :

- Compensation individuelle, aux bornes de chaque récepteur inductif : cette solution consiste que chaque équipement doit être muni d'un condensateur individuel de puissance appropriée. Elle peut être difficile à réaliser mais elle est idéale sur le plan technique .

- Compensation par secteur ou par groupe d'appareils, au niveau du tableau de distribution : pour certains ateliers de grandes usines, cette solution peut être intéressante.

- La compensation globale, en tête d'installation, au niveau basse tension ou moyenne tension: dans le cas où la batterie est fractionné en gradins où la mise en service et hors service de celles-ci est effectuée automatiquement en fonction de la puissance réactive absorbée. Cette solution convient pour les petites installations même parfois pour le cas des grosses installations.

La compensation pour qu'elle soit idéale, elle consiste à produire l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée avec quantité ajustée à la demande.

La compensation d'énergie réactive peut être fixe ou automatique selon la puissance des condensateurs.

- Si la puissance des condensateurs est inférieure à 15% de la puissance du transformateur : la compensation est dite par condensateurs fixes
- Si la puissance des condensateurs est supérieure à 15% de la puissance du transformateur : la compensation est dite par batteries de condensateurs à régulation automatique. L'adaptation de la compensation aux variations de la charge est immédiate.

Les appareils de compensation sont de trois types, adaptés au niveau de pollution harmonique du réseau électrique. Ils sont de type standard, type SAH ou type H, figure 2.

Le type d'équipement approprié est déterminé par le rapport Gh/Sn, figure 2.

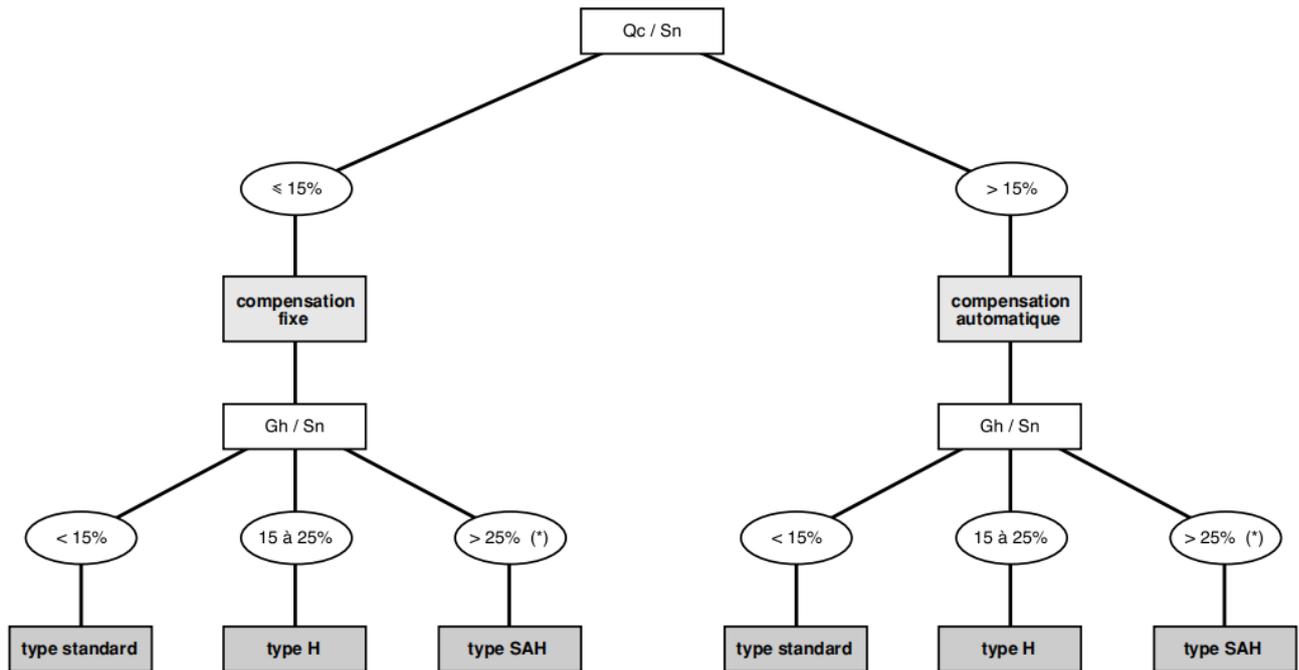


Figure 2. Types d'équipements

## V. INTERET DE L'AMELIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE

L'installation des batteries de condensateurs dans les installations électriques offre :

### La diminution des pertes en ligne :

- Comme les pertes joules sont proportionnelles au carré du courant ( $P = RI^2$ ), abaisser le courant de 10 % réduit les pertes de 19 %. Pour maintenir la même chute de tension, la section du câble pourrait être diminuée d'environ 20 %.
- Sans faire une compensation, le courant en ligne est très important, le câble et le disjoncteur doivent être surdimensionnés.
- Avec compensation et en utilisant des câbles en cuivre, on obtient moins de pertes en ligne.

### La diminution des chutes de tension

Le fait d'ajouter des condensateurs de compensation permet de limiter, voire d'annuler, la circulation des courants réactifs/inductifs dans les conducteurs en amont, réduisant ainsi les chutes de tension. Une élévation de la tension au niveau des capacités est produite lorsqu'on aura une sur-compensation.

### L'augmentation de la puissance disponible

- Lorsqu'on augmente le facteur de puissance d'une charge, le transformateur fournit moins de courant. Cette marge libérée permet d'alimenter d'autres équipements.
- Sans faire une compensation, le transformateur fonctionne en régime de surcharge.

## VI. CONCLUSION

La compensation d'énergie réactive constitue une solution clé pour optimiser les installations électriques. En neutralisant les effets de la puissance réactive, cette approche permet d'améliorer le facteur de puissance réduisant la puissance apparente circulante de >30%, de réduire les pertes d'énergie abaissant les dissipations énergétiques jusqu'à 20%, d'alléger la charge des infrastructures libérant jusqu'à 25% de capacité pour les flux actifs, et d'éviter les surcoûts. Elle contribue également à stabiliser la tension du réseau pour les équipements sensibles, garantissant un fonctionnement plus fiable et durable des équipements.

En associant efficacité énergétique et compensation réactive, les industries peuvent non seulement réaliser des économies substantielles, mais aussi participer activement à une gestion plus rationnelle des ressources énergétiques, alignée sur les objectifs de développement durable.

## REFERENCES

- [1] Y. Li, S. Mao, P. Tao, D. Li and S. Dai, "The Development of Electrochemical Energy Storage and its Application to Local Industries," 2024 3rd Asia Power and Electrical Technology Conference (APET), Fuzhou, China, 2024, pp. 600-607, doi: 10.1109/APET63768.2024.10882715.
- [2] Bera, M., Das, S., Garai, S., Dutta, S., Choudhury, M. R., Tripathi, S., & Chatterjee, G. (2025). Advancing energy efficiency: innovative technologies and strategic measures for achieving net zero emissions. *Carbon Footprints*, 4(1), N-A.
- [3] A. K. Lal Karn and S. Kakran, "Operation Management of Microgrid Supplying to the Residential, Industrial and Commercial Community using Different Demand Response Techniques," 2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE), Shillong, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEPE55035.2022.9798064.
- [4] Bera, M., Das, S., Garai, S., Dutta, S., Choudhury, M. R., Tripathi, S., & Chatterjee, G. (2025). Advancing energy efficiency: innovative technologies and strategic measures for achieving net zero emissions. *Carbon Footprints*, 4(1), N-A.
- [5] Zaghoud, O. (2025). Technological progress as a catalyst for energy efficiency: A sustainable technology perspective. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 4(1), 100084.
- [6] Wang, J., Zhang, H., Wu, B., & Liu, W. (2025). Symmetry-Guided Electric Vehicles Energy Consumption Optimization Based on Driver Behavior and Environmental Factors: A Reinforcement Learning Approach. *Symmetry*, 17(6), 930.
- [7] Haniz, A., Kawasaki, H., Hosokawa, G., Urushibata, T., Yanagi, Y., Kunitachi, T., ... & Matsumura, T. (2025). Multipath Parameter Optimization for Improving Accuracy of Ray-Tracing-based Received Power Prediction in Industrial Environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [8] D. Mestriner et al., "ITER Reactive Power Compensation Systems: analysis on reactive power sharing strategies," 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Genova, Italy, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2019.8783219.
- [9] W. Wysocki and M. Szlosek, "Compensation of reactive power as a method for reducing energy losses: On the example of calculations and measurements of load flow through the distribution transformer in one of the polish distribution network," 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lisbon, Portugal, 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/EPQU.2011.6128904.