

# TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET DÉMARCHE ÉCO-RESPONSABLE

COMMENT ET POURQUOI CHOISIR  
UN TRANSFORMATEUR BASSE TENSION ÉCODESIGN ?





***Dans un contexte de préoccupations croissantes afférentes à l'efficacité énergétique et à la réduction de l'empreinte carbone, les transformateurs basse tension jouent un rôle clé dans la production d'une énergie et d'une consommation qui respectent davantage l'environnement.***

01

## **SPÉCIFICITÉS, FONCTIONS ET TYPOLOGIE**

- 04 Spécificités techniques et normatives
- 05 Fonctions
- 05 Typologie

02

## **PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE**

- 06 Rendement
- 07 Pertes
  - Pertes à vide
  - Pertes dues à la charge

03

## **STRATÉGIES DE RÉDUCTION DES PERTES**

- 12 Filtrage des harmoniques de courants et compensation réactive
- 12 Puissance et optimisation de la charge

04

## **COÛT, MAINTENANCE ET RÉPARATION**

- 13 Coûts d'achat et d'exploitation
- 14 Maintenance et réparation

05

## **RETOUR SUR INVESTISSEMENT ET IMPACT CARBONE**

- 15 Un simulateur de calcul du ROI
- 16 Transition énergétique et RSE
- 16 Normes et réglementation

# LA RECHERCHE DE RÉDUCTION DU COÛT ÉNERGÉTIQUE

## LES DÉFIS ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

La réduction des coûts énergétiques est challengée par l'inflation et les enjeux écologiques, notamment dans l'industrie. Chez celle-ci, quel que soit le secteur (médical, transport, nucléaire, pétrochimie, militaire, etc.), le transformateur basse tension est un élément incontournable du réseau.

Les transformateurs d'isolement basse tension assurent une distribution efficace de l'énergie, tout en minorant les pertes énergétiques et leur impact environnemental.

Conçus pour fonctionner à des puissances pouvant atteindre plusieurs centaines de kVA, ces dispositifs sont essentiels à l'optimisation des performances énergétiques des réseaux électriques.

Dans le secteur industriel français, les pertes des transformateurs sont évaluées à 2,2 TWh par an. Néanmoins, le déploiement de transformateurs à pertes réduites reste relativement limité, ce qui signifie une économie d'énergie potentielle d'environ 1,1 TWh.

Parce qu'ils fonctionnent fréquemment en continu, remplacer l'ensemble des transformateurs de l'UE par des équipements plus performants favoriserait une réduction des pertes d'environ 18,5 TWh/an. Au coût estimé de 25 c€/kWh, cela correspond à une économie potentielle de 4,6 milliards d'euros.

Depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2021, le règlement (UE) n°2019/1783 issu de la directive Européenne qui vise à diminuer les consommations de certaines catégories de produits - dont les transformateurs - s'applique aux équipements haute tension.

Devenant l'extension de cette norme au marché de la basse tension, Circé, spécialisé dans la conception et la fabrication de produits bobinés, a mis au point un procédé de fabrication de transformateurs « ÉcoDesign » de type sec.

Cette innovation anticipe les exigences européennes de haut rendement, lesquelles sont déjà de 98 % pour la haute tension et permet de réduire significativement la perte d'énergie de ces équipements.



# 01

## SPÉCIFICITÉS, FONCTIONS ET TYPOLOGIE

### SPÉCIFICITÉS TECHNIQUES ET NORMATIVES

Un transformateur est composé de deux bobines enroulées autour d'un circuit magnétique, constitué de tôles magnétiques. Chaque bobine est formée de spires de matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'aluminium. Ces transformateurs peuvent ajuster une tension ou isoler une machine du réseau électrique.

Une tension alternative appliquée aux bornes de l'enroulement primaire induit un flux variable dans le circuit magnétique générant ainsi une tension dans l'enroulement secondaire. Le rapport de tension entre les deux bobines dépend du nombre de spires dans chacune d'elles.

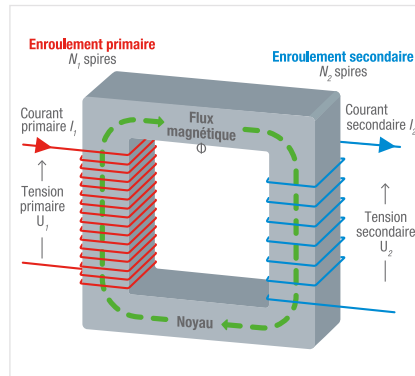
Un transformateur se définit par les caractéristiques techniques et normatives suivantes :

- type (immergé ou sec)
- référence normative (ex. NF EN 60076-11)

- puissance absorbée, énoncée en kVA ( $S_n$ )
- tensions assignées primaire et secondaire (U), énoncées en V
- fréquence d'utilisation
- couplage et indice horaire
- équipement de protection (disjoncteurs, sonde de température...)
- niveaux de pertes dues à la charge (PJ en W)
- niveaux de pertes à vide (PO en W)
- mode de refroidissement, pour les transformateurs de type secs : AN (air naturel) AF (air forcé)

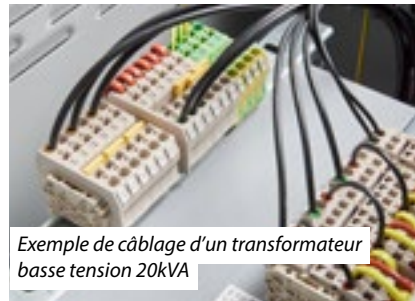
## FONCTIONS

Les transformateurs d'isolement basse tension sont conçus pour modifier les valeurs de tension dans les réseaux électriques, tout en maintenant les circuits séparés électriquement, permettant ainsi une isolation galvanique et une diminution des interférences. Principalement utilisés dans des contextes



industriels et résidentiels, ces transformateurs sont essentiels pour protéger les équipements et assurer la sécurité des installations.

Installés dans des armoires électriques ou des postes de transformation, ils garantissent



une distribution homogène de l'électricité. Équipés de dispositifs de protection et de surveillance, ils préviennent surcharges, courts-circuits et défaillances potentielles.

## TYPOLOGIE

Les transformateurs sont de type sec ou immergé. En raison de leur facilité de maintenance et de leur sécurité accrue, les transformateurs secs sont préférés pour les environnements intérieurs. Les transformateurs immergés sont utilisés lorsqu'une meilleure dissipation de la chaleur est nécessaire.

Idéalement, un transformateur doit être chargé à 70 %, laissant 30 % de marge pour les évolutions futures de la charge. Pour les transformateurs de distribution haute tension, qu'ils soient de type immergé ou sec, des normes spécifiques définissent les niveaux de pertes en fonction de la puissance.

### Relation entre Watts et VA

$$P_{eff} \text{ (en kW)} = k \times S_n \text{ (en kVA)} \times \cos \varphi$$

$k$  = facteur de déclassement du transformateur en fonction du spectre harmonique

$\varphi$  = facteur de puissance de l'installation

$S_n$  = puissance apparente

$P_{eff}$  = puissance active



# 02

## PERFORMANCE

## ÉNERGÉTIQUE

### RENDEMENT

Quelle que soit la condition de charge, le rendement ( $\eta$ ) d'un transformateur, est exprimé par le rapport entre la puissance de sortie ( $P_2$ ) et la puissance d'entrée ( $P_1$ ).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

### PERTES

Les pertes des transformateurs se divisent en 2 catégories :

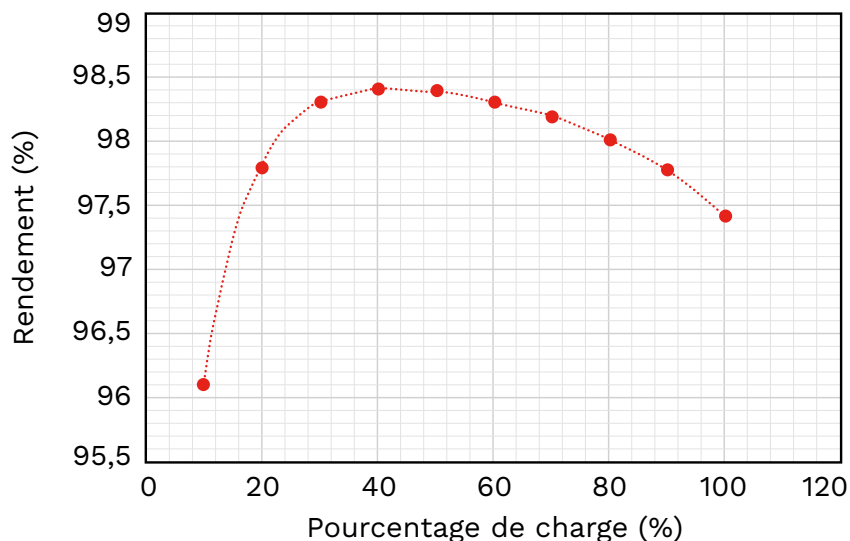
- les pertes à vide ( $P_0$ ), également appelées pertes fer
- les pertes dues à la charge ( $P_J$ ), également appelées pertes joules

#### Pertes à vide

Elles varient en fonction de la fréquence et de la tension appliquées et surviennent dès la mise sous tension, laquelle génère un flux dans le circuit magnétique du transformateur. Dans les faits, la fréquence



*Exemple de rendement en fonction de la charge  
pour un transformateur de 250kVA*



fondamentale des réseaux électriques est stable, ce qui favorise la constance et l'indépendance de ces pertes par rapport à la charge du transformateur. Les pertes à vide représentent de 0,5 à 1% de la puissance assignée Sn.



Elles comprennent :

- **Des pertes par hystérésis.**

Provoquées par les variations du flux dans le circuit magnétique, elles relèvent du type de matériau employé dans la fabrication du circuit magnétique du transformateur et sont directement proportionnelles à la fréquence.

Ces pertes par hystérésis représentent environ 50 % des pertes à vide. Elles peuvent

désormais être limitées en sélectionnant des tôles à grains, orientées laminées à froid et optimisées par un traitement laser.

- **Des pertes par courant de Foucault.**

En moyenne, les pertes par courant de Foucault constituent 25 % des pertes à vide. Ce sont les variations du flux dans le circuit magnétique qui les engendrent. Ces pertes dépendent de l'épaisseur et de la résistivité du matériau, ainsi que du carré de la fréquence.

- **Pertes par excès.**

Attribuées aux mécanismes internes microscopiques des tôles magnétiques, elles varient en fonction de la fréquence avec un exposant de 1,5 et constituent en moyenne 25 % des pertes à vide.

### **Pertes dues à la charge**

Elles sont associées à la composante fondamentale du courant ainsi qu'aux harmoniques de courants. Comme elles augmentent les pertes liées à la charge, il est indispensable de connaître le spectre et l'amplitude de ces harmoniques de courants.

C'est parce qu'elles sont proportionnelles au carré du courant traversant les enroulements que toutes les pertes fluctuent.

Elles comprennent :

- **Les pertes Joule dans les conducteurs des enroulements primaires et secondaires.**

Augmenter la section du conducteur permet de réduire ces pertes qui surviennent dans les enroulements du transformateur et sont causées par la résistance du conducteur. Proportionnelle à la résistance du bobinage, leur amplitude varie en fonction du carré du courant de charge.

- **Les pertes parasites par courants de Foucault dans les enroulements.**

Inhérent au fonctionnement du transformateur, le courant alternatif parcourt le conducteur composant les enroulements et génère un champ magnétique. Celui-ci induit des courants, appelés courants de Foucault, lesquels causent des pertes ohmiques additionnelles, également connues sous le nom de pertes parasites par courants de Foucault. En moyenne, les pertes dues à la charge représentent de 3 à 5 % de la puissance nominale assignée (à pleine charge, soit 100 %).



- **Les pertes parasites par courants de Foucault dans les éléments métalliques structurels et les connexions.**

Lorsqu'il est traversé par un courant alternatif, un conducteur crée un champ d'induction variable, lequel génère un courant induit dans les composants métalliques de la structure du transformateur. Cela entraîne des pertes supplémentaires, appelées pertes parasites par courants de Foucault dans les connexions et les parties structurelles métalliques.

- **Les pertes liées à la charge, provenant des harmoniques de courants<sup>1</sup> et de la puissance réactive.**

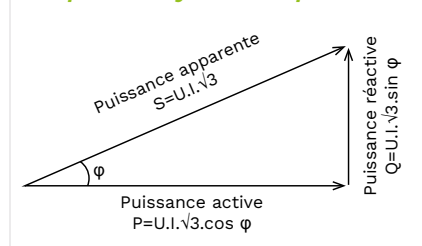
Étant donné que les pertes dues aux courants de Foucault dépendent du carré de la fréquence, la présence d'harmoniques multiples de la fréquence fondamentale de 50 Hz entraîne des pertes supplémentaires dans les enroulements et les parties métalliques de la structure. En raison de la fréquence des composantes harmoniques, les harmoniques de courants augmentent la valeur du courant efficace, ce qui accroît significativement les pertes. L'impact des harmoniques de courants sur les pertes s'apprécie, soit par le calcul des pertes, soit via le facteur K (ou facteur de déclassement). Facile d'utilisation, le facteur K évalue l'influence des harmoniques de courants sur la charge du transformateur, estimant ainsi son taux de déclassement. Cette appréciation permet de concevoir le transformateur de façon à ce que les pertes totales causées par une charge non linéaire ne dépassent pas celles prévues pour la fréquence fondamentale.

### 1 Harmoniques de courants

Courants dont la fréquence est un multiple de la fréquence principale, causés par les charges non linéaires du réseau tels les ordinateurs, les harmoniques de courants augmentent les pertes en charge de manière disproportionnée par rapport à l'augmentation de la charge et peuvent endommager les transformateurs. En outre, ils élèvent la température des enroulements et de la structure métallique du transformateur, ce qui réduit sa durée de vie.

Les pertes liées à la charge résultent de la puissance réactive et des harmoniques de courants. Ces pertes comprennent trois puissances :

### Triangle des puissances pour un système triphasé



- La **puissance apparente S** est celle que le transformateur sollicite du réseau. Cette puissance apparente S est mesurée en VA. Sa valeur dans un système triphasé est :

$$S = U \times I \times \sqrt{3}$$

- La **puissance active P** représente le travail utile consommé par l'installation. Pour quantifier la puissance active disponible, on utilise le facteur de puissance, défini comme le rapport P/S et équivalent à  $\cos \varphi$ . Cette puissance active P est exprimée en W. Sa valeur dans un système triphasé est :

$$P = U \times I \times \sqrt{3} \times \cos \varphi$$

- La **puissance réactive Q** est requise pour magnétiser les circuits des charges, comme les moteurs. Cette puissance

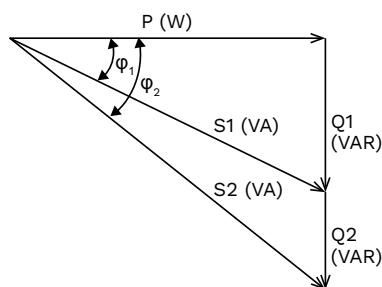
réactive Q est exprimée en VAR. Sa valeur dans un système triphasé est :

$$Q = U \times I \times \sqrt{3} \times \sin \varphi$$

La **puissance apparente** est définie par la relation :

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$$

### Figure de représentation de l'équivalence des puissances

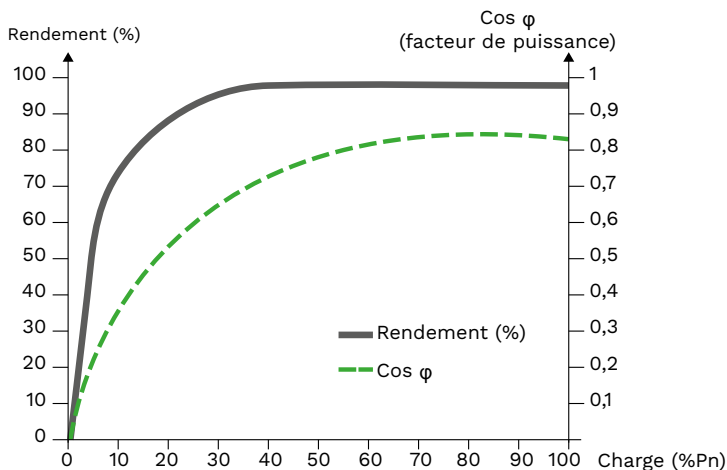


La figure à gauche d'équivalence des puissances indique une consommation excessive ( $Q2-Q1$ ) de puissance réactive, induite par un mauvais  $\cos \varphi_2$ .

C'est la valeur de la puissance apparente qui détermine la limite de puissance du transformateur. Par conséquent, pour une puissance active donnée, plus la puissance réactive est élevée, plus le transformateur sera chargé et s'échauffera, ce qui réduira sa durée de vie.

Le graphique ci-dessous démontre que le rendement du transformateur fluctue avec le  $\cos \varphi$ , rendant essentiel le fait d'abaisser la puissance réactive consommée.

### Évolution du rendement d'un transformateur ÉcoDesign en fonction de sa charge





# STRATÉGIES DE RÉDUCTION DE PERTES

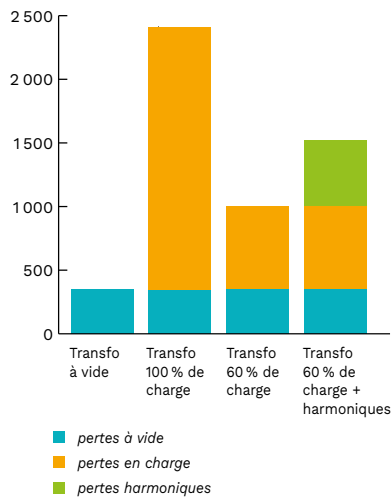
Non assujetties aux charges, les pertes à vide ne sont pas modifiables par des moyens externes. Cependant, deux manières permettent de diminuer ces pertes.

## FILTRAGE DES HARMONIQUES DE COURANTS ET COMPENSATION RÉACTIVE

**Les harmoniques de courants** augmentent les pertes. Néanmoins, des solutions pour les réduire dans les réseaux pollués existent. Parmi celles-ci, la réduction du taux d'harmoniques à la source après calcul, l'insertion de filtres (passifs, actifs) ou encore le recours aux inductances anti-harmoniques en série avec des condensateurs de compensation.

**La compensation réactive** optimise l'utilisation de la puissance du transformateur et permet de ramener les pertes à 50 Hz.

*Répartition des pertes en fonction de la charge et des harmoniques*



## PUISSANCE ET OPTIMISATION DE LA CHARGE

Puissance requise, nature de la charge et conditions environnementales sont des critères qu'il convient d'examiner lors de la sélection d'un transformateur. Car, si celui-ci est correctement dimensionné, son efficacité sera

optimisée et ses pertes énergétiques réduites : un transformateur sous-chargé cause des pertes à vide inutiles, tandis qu'un transformateur proche de sa charge nominale engendre des pertes en charge élevées. Généralement, le rendement maximal d'un transformateur se situe entre 40 % et 60 % de sa charge nominale, mais d'autres facteurs interviennent également, tels que la charge, le  $\cos \varphi$ , et la température ambiante.

Afin de limiter les échauffements, les pertes et les risques de dommages aux transformateurs, il est recommandé de diminuer les harmoniques de courants, de même que la puissance réactive.

**Maximiser l'efficacité d'un transformateur signifie optimiser sa charge.**

Le point d'équilibre entre performance, durabilité et réduction des pertes à vide et en charge est atteint lorsqu'un transformateur fonctionne entre 40 % et 60 % de sa capacité nominale.

# 04

## COÛT, MAINTENANCE ET RÉPARATION

### COÛTS D'ACHAT ET D'EXPLOITATION

Le coût global actualisé intègre non seulement l'achat, mais également l'installation, l'exploitation et la maintenance. Pour les transformateurs de puissance identique, les coûts d'installation, de maintenance et d'élimination en fin de vie sont quasiment analogues.

#### Coût total d'obtention du transformateur

$$CTO = P_P + A \times P_0 + B \times P_k$$

*P<sub>P</sub> : coût d'achat du transformateur  
A : coût des pertes à vide, mesuré en €/W  
P<sub>0</sub> : total des pertes à vide  
B : coût des pertes dues à la charge, mesuré en €/W  
P<sub>k</sub> : pertes dues à la charge*

➔ L'estimation du coût des pertes à vide et de celles dues à la charge dépend de l'évolution du régime de charge du transformateur, du coût de l'énergie, du taux d'actualisation et de la durée de vie du transformateur.



## MAINTENANCE ET RÉPARATION

La maintenance préventive est essentielle pour assurer fiabilité et performances optimales. Inspection, nettoyage et remplacement des composants usés participent des actions de maintenance préventives, conseillées tous les 6 mois.

Les opérations de maintenance permettent d'enrayer l'usure précoce causée par la température. La régularité des entretiens évite la dégradation des performances énergétiques.

13

La réparation peut concerner le rebobinage des enroulements. Il s'agit d'une opération complexe qui nécessite le démontage de la partie active, le rebobinage des enroulements, le réassemblage de la partie active et des contrôles finaux. Dans l'hypothèse d'une anomalie grave nécessitant un rebobinage, il est utile d'évaluer en premier lieu, la pertinence du remplacement par un nouveau transformateur à pertes réduites.



| Opérations de maintenance                                                                                                                                                     | → | Prévention des risques                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Contrôle des dispositifs de protection (capot, verrouillage, mise à la masse)                                                                                                 | → | Prévention des risques aux personnes                                                       |
| Tests des relais de protection, avec déclenchement                                                                                                                            | → | Validation du bon fonctionnement des protections en amont et en aval                       |
| Resserrage des bornes et des raccordements                                                                                                                                    | → | Identification des points chauds relatifs à un serrage insuffisant                         |
| Vérification de l'efficacité de la ventilation du transformateur et de son local                                                                                              | → | Repérage des échauffements préjudiciables : la norme recommande un maximum de 40 °C        |
| Si l'installation évolue, identification du profil de charge sur une période de consommation pertinente, via les mesures de courants, tensions, et puissances des harmoniques | → | Détection des surcharges éventuelles et des distorsions anormales de tension et de courant |
| Inspection de l'état des câbles et des bornes de raccordement. Entretien, nettoyage des pièces sous tension, telles que les connexions et traversées                          | → | Anticipation des risques d'amorçages                                                       |
| Mesure via caméra infrarouge du transformateur sous tension et en charge                                                                                                      | → | Détection des points chauds                                                                |

| La température, facteur d'usure précoce | → | Répercussions                                                                        | → | Opérations de maintenance                                                                                        |
|-----------------------------------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Échauffements                           | → | Dégradation des isolants                                                             | → | Augmentation de la ventilation du transformateur et du local. Réduction de la charge                             |
| Surcharges                              | → | Échauffements et usure précoce des isolants                                          | → | Diminution de la puissance absorbée par les charges et/ou du nombre de charges alimentées. Optimisation du cos φ |
| Harmoniques de courants                 | → | Pertes supplémentaires entraînant des échauffements préjudiciables au transformateur | → | Vérification du niveau d'harmoniques et de la charge du transformateur                                           |

➔ **Les transformateurs sont connus pour leur robustesse et leur fiabilité et dans des conditions d'utilisation normales, leur durée de vie peut dépasser 20 ans.**



05

**RETOUR**

**SUR INVESTISSEMENT**

**ET IMPACT CARBONE**

**Bien dimensionnés, les transformateurs basse tension à haut rendement apparaissent comme une composante majeure de l'efficacité énergétique des installations électriques.**

En gérant le choix et la maintenance de ces équipements, les industries peuvent non seulement réduire leurs coûts opérationnels, mais également contribuer à un avenir plus durable.

### **UN SIMULATEUR EN LIGNE POUR LE CALCUL DU ROI**

14

En calculant le gain sur la facture d'énergie, le simulateur en ligne du site internet de Circé permet d'établir précisément le délai du retour sur investissement lié à l'installation d'un transformateur à haut rendement (rendement

atteignant 98 % en fonction de la puissance).



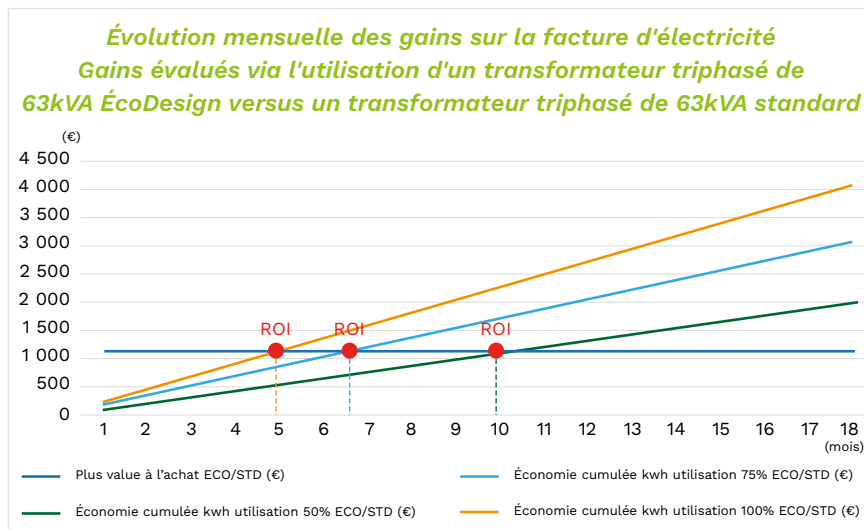
*Calcul direct  
du ROI*

En fonction des conditions d'utilisation et de la puissance, les transformateurs ÉcoDesign de Circé offrent un retour sur investissement qui varie de 5 mois à 3 ans.

## TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET RSE

D'ici 2030, la France s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 40 % par rapport à 1990, challengeant la Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE) en matière d'impact environnemental.

Les Entreprises de Taille Intermédiaire (ETI) sont tenues de publier chaque année un rapport sur leur responsabilité sociale et environnementale. Conformément à la loi Grenelle II, celui-ci doit informer de leurs émissions de gaz à effet de serre et des mesures prises pour les réduire. Elles ont également l'obligation de réaliser un audit énergétique tous les quatre ans, audit qui



## NORMES ET RÉGLEMENTATION

Bien qu'intégrée à la IEC 60364-8-1, l'efficacité énergétique des transformateurs basse tension reste à traiter en profondeur dans les législations européennes et françaises. Néanmoins, d'un point de vue normatif, différents documents sont en vigueur et des certifications existent déjà, garantes de qualité :

- CEI 60076-12 : guide de charge pour transformateurs de type sec
- NF EN 60076-1 à 60076-5 : transformateurs de puissance
- NF EN 60076-11 : transformateurs de puissance de type sec
- CEI 615508-1 : norme internationale appliquée dans l'industrie et traitant de la sécurité fonctionnelle des systèmes électriques.

TÉL. +33 (0)2 43 40 99 21  
info@circe-technologies.com  
**circe-technologies.com**

ZA La Boussardière  
72250 Parigné-l'Évêque  
FRANCE

