

Eco-bilan de la réparation/maintenance de matériel électrique

Efficacité énergétique :

La profession se mobilise...



SIRMELEC

SERVICE & MAINTENANCE  
DE MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

[www.sirmelec.fr](http://www.sirmelec.fr)

Groupement des entreprises de service et de maintenance de matériel électrique





# Édito

**D**epuis sa création, l'action du SIRMELEC s'inscrit dans une tradition fortement ancrée de représentation professionnelle du secteur de la réparation de matériel électrique et se comprend dans l'écosystème plus large de l'industrie électrique et désormais électronique et de communication (FIEEC). Depuis toujours, le SIRMELEC a été le gardien et le porteur de certaines valeurs dans le métier : celles de la qualité des travaux accomplis, de la célérité et de la diligence dans leur accomplissement. Ce sont là les valeurs qui fondent ce groupement et le cimentent depuis sa création.



Aujourd'hui, dans un monde en constante évolution, le rôle du SIRMELEC est d'accompagner les entreprises du secteur dans leur mutation et de les aider à faire face aux grands enjeux sociétaux à venir. Le défi climatique est à ce titre un axe majeur de travail, avec son corolaire direct : l'efficacité énergétique.

Les entreprises de service et de maintenance de matériel électrique sont au cœur des process industriels. Elles disposent d'un savoir faire reconnu, d'une expertise et d'une proximité qui crée un lien de confiance majeur avec leurs clients industriels. En effet, qui mieux que celui qui maintient et entretient les matériels électriques d'un client peut le conseiller sur leur optimisation, qu'elle soit énergétique, technique, voire économique.

C'est pourquoi cette profession joue un rôle central dans l'efficacité énergétique industrielle. Aussi, afin de délivrer aux entreprises du secteur une base documentaire fiable dans ce domaine,



le SIRMELEC, en partenariat avec l'ADEME, a décidé d'entreprendre une étude de l'écobilan de l'activité de réparation. En effet, connaître la réalité de l'impact environnemental de notre activité est une première étape indispensable pour pouvoir conseiller au mieux nos clients. Pour cette étude, confiée à Bureau Veritas CODDE, nous nous sommes basés sur un logiciel d'écoconception de référence dans la profession, et avons examiné l'impact de notre activité sur les onze indicateurs environnementaux (matières premières, consommations d'énergie, émissions dans l'air, dans l'eau, traitement des déchets, etc...) durant toutes les phases du cycle de vie de deux moteurs et de deux transformateurs (en comparant l'impact d'un matériel neuf avec celui d'un matériel réparé).

Nous avons ainsi obtenu une radiographie très précise de l'impact de notre activité à chaque étape : cette source d'informations est très importante car son analyse nous permet à la fois d'améliorer notre pratique et surtout de mieux conseiller nos clients. Ce document en est une synthèse qui concentre les principaux enseignements de cette étude.

C'est ainsi que le SIRMELEC perçoit son rôle : mettre à disposition des entreprises du secteur les outils d'analyse de leur propre profession pour que chacun puisse aller de l'avant et jouer le rôle dévolu à nos métiers dans le grand mouvement de l'efficacité énergétique industrielle. ■

**Georges Redregoo,**  
*Président du SIRMELEC*



# Sommaire

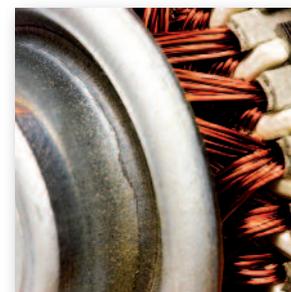
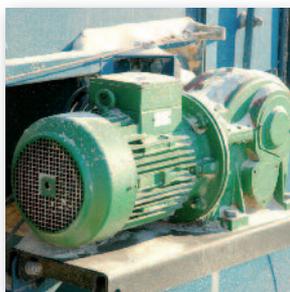
■ Une profession engagée pour l'efficacité énergétique	p. 6
■ Description technique de l'étude	p. 8
■ Les moteurs	p. 11
● Aspects significatifs	p. 12
● Comparaison moteur neuf et moteur réparé	p. 14
● Analyses de sensibilité	p. 16
● Conclusion	p. 18
■ Les transformateurs	p. 21
● Aspects significatifs	p. 22
● Comparaison transformateur neuf et reconditionné	p. 24
● Analyses de sensibilité	p. 26
● Conclusion	p. 28

# Une profession engagée pour l'efficacité énergétique

Si vous voulez améliorer l'efficacité énergétique de votre installation industrielle...

**Adressez-vous à votre réparateur !**

Qui mieux que celui qui s'occupe de la maintenance et du service de vos matériels électriques peut vous conseiller sur leur optimisation ?



## ► Proximité et expertise

Votre réparateur est un spécialiste des machines tournantes, des systèmes d'entraînements et des transformateurs.

Au plus près de vous, il connaît vos besoins et dispose d'une expertise éprouvée pour vous conseiller sur la solution la plus efficace du point de vue énergétique, technique, mais aussi économique.

Les professionnels du service et de la maintenance de matériel électrique, regroupés au sein du SIRMELEC, se mobilisent pour contribuer efficacement à améliorer l'efficacité énergétique de votre installation industrielle.

## ► Une profession responsable

Agir pour l'efficacité énergétique, c'est d'abord évaluer son propre impact sur l'environnement.

Le SIRMELEC vient de réaliser, en partenariat avec l'ADEME, une étude complète sur l'éco-bilan de la réparation des moteurs et des transformateurs électriques.

Le présent document synthétise cette étude (étude complète disponible sur demande auprès du Sirmelec : [www.sirmelec.fr](http://www.sirmelec.fr)).

## ► L'apport d'un professionnel du service et de la maintenance de matériel électrique

- Une expertise et une compétence reconnus.
- Une parfaite connaissance de vos besoins grâce à une proximité accrue.
- Une maîtrise technique sur l'ensemble du système d'entraînement et du système électrique.

- Une prise en compte de vos besoins et de vos contraintes financières.

Le professionnel du service et de la maintenance de matériel électrique est l'intervenant le plus à même de vous conseiller et vous accompagner dans votre démarche d'efficacité énergétique en prenant en compte vos besoins techniques et vos contraintes financières. Son expérience et sa vision globale vous seront précieuses pour adapter au mieux votre installation à vos besoins.

Il saura également vous informer sur les dispositifs d'incitation financière concernant les réalisations d'efficacité énergétique (Certificats d'Economie d'Energie, Prêts participatifs Eco-énergie d'OSEO", etc.) qui peuvent s'appliquer à vos travaux.

**Votre réparateur est à votre disposition, n'hésitez pas à le solliciter !**

## Remplacer ou réparer votre matériel électrique ? Quelques éclairages...

### Vrai

Un moteur de meilleur rendement réduit la consommation d'énergie.  
L'essentiel de la consommation énergétique d'un moteur a lieu durant sa phase d'utilisation. Plus le rendement est élevé, plus les consommations seront basses.

### Faux

Le rebobinage ferait perdre du rendement à votre moteur.  
Une étude menée par l'AEMT\* et l'EASA\* démontre, sur 20 moteurs différents, qu'un rebobinage fait selon les règles de l'art ne dégrade pas le rendement initial de la machine, voire peut l'améliorer.

\*AEMT : Association of Electrical and Mechanical Trade

\*EASA : Electrical Apparatus Service Association

### Faux

Améliorer votre impact environnemental passe nécessairement par le renouvellement de votre matériel.  
Ce n'est pas automatique. Au-delà du rendement, beaucoup de paramètres entrent en compte et il faut considérer le cycle de vie sur son ensemble. Selon les circonstances, la réparation, la remise à niveau de votre matériel électrique ou l'optimisation de votre système d'entraînement seront plus efficaces du point de vue environnemental que le remplacement par un matériel neuf. Dans tous les cas, une pré-étude est nécessaire.

# Description technique de l'étude

L'écobilan SIRMELEC / ADEME est une analyse du cycle de vie comparative sur deux types de matériels : **des moteurs et des transformateurs électriques.**

A chaque phase du cycle de vie (fabrication, distribution, utilisation, fin de vie), 3 indicateurs de flux et 8 indicateurs d'impact environnemental (voir ci-contre) ont été analysés, et ce pour un matériel neuf et reconditionné. Pour cela, chacune des phases a été décomposée et son impact sur l'environnement quantifié.

Cette étude a un double objectif :

- Définir pour le matériel étudié neuf ou reconditionné quels sont ses impacts significatifs sur l'environnement au cours des différentes phases de son cycle de vie.
- Comparer, après une panne, l'impact du remplacement par un matériel neuf avec l'impact de la réparation de ce matériel.

Cette étude a été réalisée par la société CODDE – Bureau Veritas qui s'est appuyée sur le logiciel d'écoconception EIME version 5 et sur des bases de données spécifiquement conçues pour les produits électriques et électroniques.

## Produits étudiés



1 moteur de 55 kW  
1 moteur de 450 kW



1 transformateur de 1250 kVA  
1 transformateur de 4100 MVA

*Toutes les données détaillées concernant les modèles choisis pour cette étude sont consultables dans les rapports complets de l'étude sur demande auprès du SIRMELEC.*

## Indicateurs de flux



### WD (Water Depletion), consommation d'eau

Cet indicateur, exprimé en m<sup>3</sup>, permet de calculer la consommation d'eau toutes sources confondues (rivière, mer, lac...). Les eaux comptabilisées dans cet indicateur sont les eaux rejetées dans le milieu sous une forme dégradée, les eaux de refroidissement et eaux utilisées en boucle fermées ne seront pas considérées.



### ED (Energy Depletion), consommation d'énergie primaire totale

Cet indicateur permet de calculer la consommation d'énergie primaire totale, aussi bien issue de la combustion de combustibles par le biais de leur pouvoir de combustion inférieurs (PCI) (fossiles, uranium pour l'énergie nucléaire, bois, etc.) que de sources alternatives (hydro-électricité, solaire, éolienne, marée motrice, etc.). L'indicateur prend aussi en compte l'énergie contenue dans les matériaux (qui est produite lors de leur combustion en fin de vie par exemple). Il est exprimé en MJ.



### HWP (Hazardous Waste production), production de déchets dangereux

Cet indicateur permet de calculer la quantité de déchets dangereux produite pour un produit donné. Cette production s'ajoute à l'inventaire des flux de déchets dangereux de l'Analyse du Cycle de Vie. Les déchets entrant dans la composition de cet indicateur sont les suivants : déchets radioactifs, cendres et résidus d'incinération et boues rouges. Il est exprimé en kg.

## Indicateurs d'impact

Les huit indicateurs d'impact utilisés dans la méthodologie EIME sont:



### AA (Air Acidification), acidification de l'air

Cet indicateur permet de calculer l'acidification de l'air par les émissions atmosphériques. Il est exprimé en g eq H<sup>+</sup>. La méthodologie de calcul est issue du CML (Centre of Environmental Science, NL, 1998).



### AT (Air Toxicity), toxicité de l'air

Cet indicateur, exprimé en volume critique (m<sup>3</sup>), permet de calculer la toxicité de l'air ambiant (couche troposphérique), en prenant en compte les concentrations limites autorisées des émissions atmosphériques. La méthodologie est issue de BUWAL (BUWAL, index CVCH-Air, Swiss, 1991).



### GWP (Global Warming Potential), production de gaz à effet de serre

Cet indicateur permet de calculer la contribution au réchauffement global de la planète par l'émission de gaz à effet de serre. Il est exprimé en g eq CO<sub>2</sub>. La méthodologie de calcul est issue de l'IPCC (International Panel of Climate Change, US, 2007), nous avons considéré un horizon à 100 ans. (Pour résumer : Méthode IPCC2007, GWP100).



### OD (Ozone Depletion), réduction de la couche d'ozone

Cet indicateur permet de calculer la contribution à la diminution de la couche d'ozone stratosphérique par les émissions atmosphériques. Il est exprimé en g eq CFC11. La méthodologie de calcul est issue du WMO (World Meteorological Organization, US, 1998).



### POC (Photochemical Ozone Creation), création d'ozone photochimique

Cet indicateur, exprimé en g eq C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, permet de calculer la quantité d'ozone produite dans la couche troposphérique par l'action des radiations solaires sur les émissions de gaz oxydants (appelé SMOG d'été ; cf pics d'ozone en été). La méthodologie de calcul est issue de l'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe, Protocol to the convention on long-range transboundary air pollution concerning the control of emissions of volatile organic compounds of the transboundary fluxes, Geneva, 1991).



### RMD (Raw Material Depletion), consommation des matières premières ou épuisement des ressources naturelles

Cet indicateur permet de calculer la consommation des ressources naturelles en prenant en compte la taille des réserves Rapport d'Analyse du Cycle de Vie Bureau Veritas CODDE© 29/02/2012 Page 22 sur 55 naturelles et le taux de consommation de l'économie actuelle. Il est exprimé en fraction de réserve consommée par an (Année-1). La méthodologie de calcul est issue du « US Geological Survey » (USA, 1998).



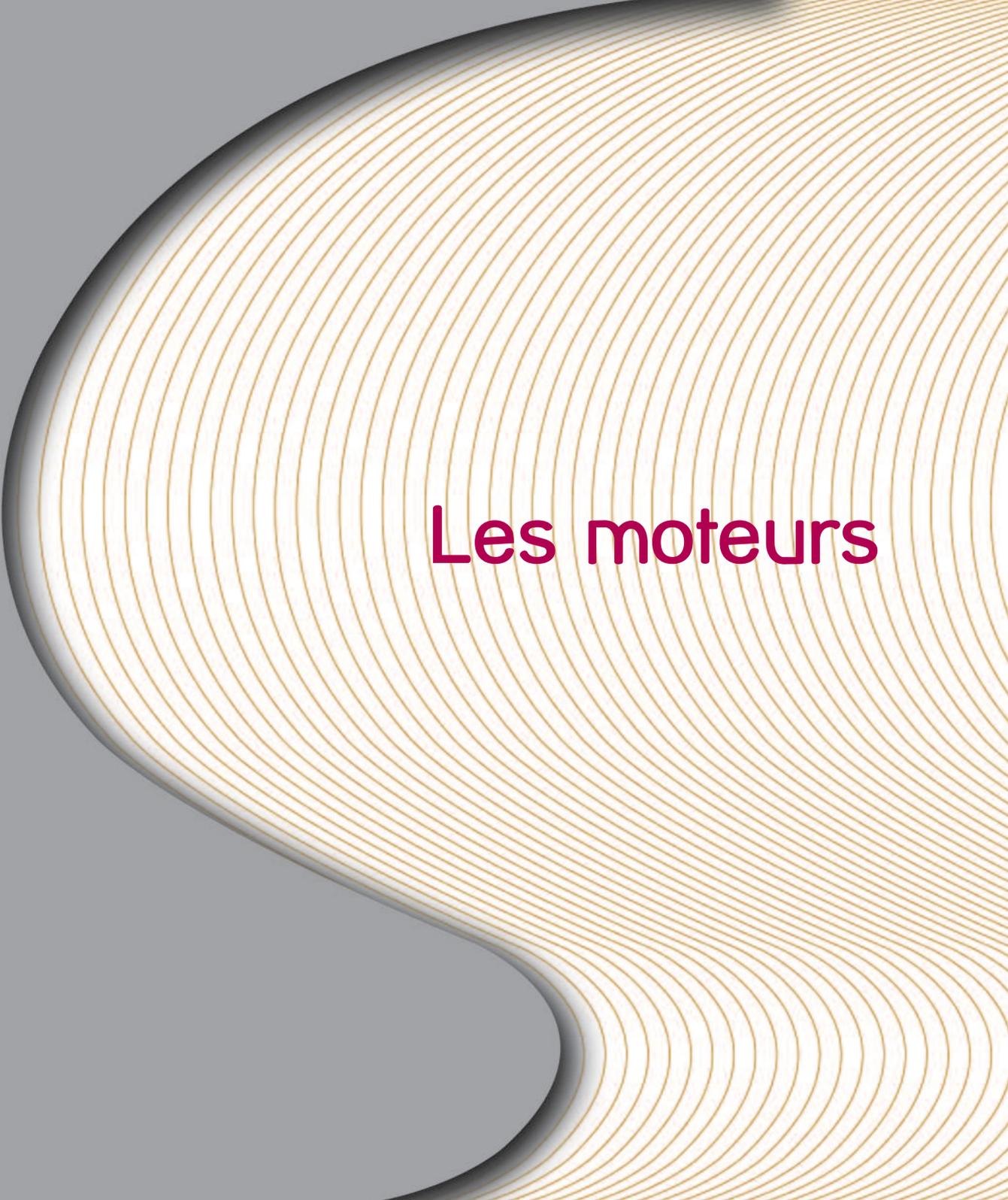
### WE (Water Eutrophication), eutrophisation de l'eau

Cet indicateur permet de calculer l'eutrophisation (enrichissement en éléments nutritifs) des océans et des lacs par les effluents. Il est exprimé en g eq PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. L'eutrophisation d'un cours d'eau résulte d'un apport trop important de molécules nutritives (molécules organiques) dans le milieu. Le phosphore, l'azote, le carbone, le potassium sont des éléments qui permettent le développement d'algues et d'espèces aquatique pouvant conduire à une diminution du taux d'oxygène et à un déséquilibre de la biocénose. La méthodologie de calcul est issue du CML (Centre of Environmental Science, NL, 1992).



### WT (Water Toxicity), toxicité de l'eau

Cet indicateur, exprimé en volume critique (dm<sup>3</sup>), permet de calculer la toxicité de l'eau en prenant en compte les concentrations limites autorisées des effluents. Dans cette analyse, nous avons choisi de caractériser l'impact sur la pollution de l'eau par la méthode des volumes critiques. Cette méthode, bien que ne prenant pas en considération les impacts liés aux substances phytosanitaires de type pesticides par exemple, a été retenue pour sa forte application dans le milieu de l'Analyse du Cycle de Vie (programme PEP Ecopassport, Référentiel FDES). De plus, les problématiques associées à l'industrie des équipements électrique électronique sont représentés par cette méthode. La méthodologie est issue de BUWAL (BUWAL, index CVCH-Water, Swiss, 1991).



# Les moteurs



# Aspects significatifs pour les moteurs

L'analyse du cycle de vie des moteurs neufs et des moteurs rebobinés (de 55 kW ou de 450 kW) fait ressortir un certain nombre de constantes. Ainsi, il apparaît que :

- ▶ **L'étape d'utilisation** est responsable de la majorité des impacts sur les 11 indicateurs (de 69 % à 99 %). La production de l'énergie électrique consommée par le moteur pendant la phase d'utilisation (due notamment aux pertes par effet joule) joue un rôle majeur.
- ▶ **La phase de fabrication** (ou de reconditionnement pour les moteurs réparés) contribue de manière significative à l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles.
- ▶ **Les phases de distribution et de fin de vie** sont des contributeurs mineurs à tous les indicateurs.

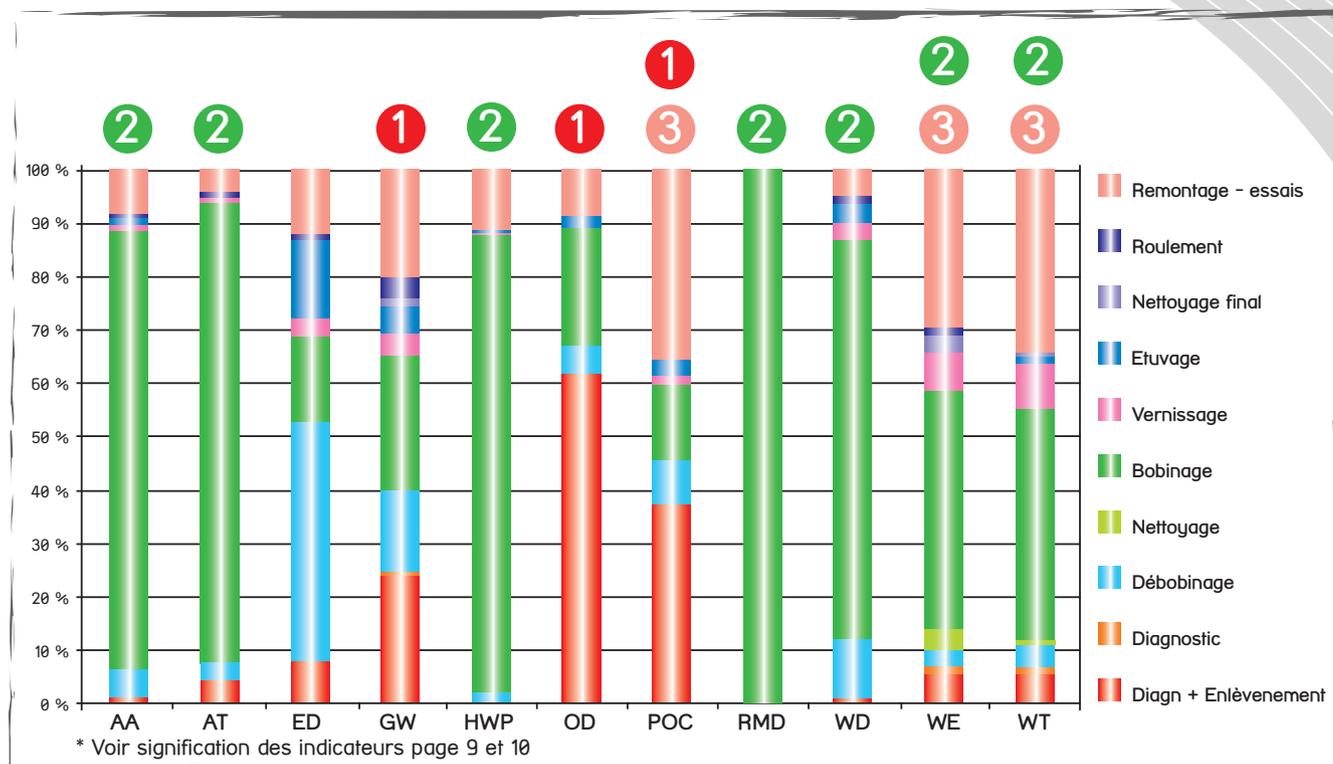
Empreinte CO<sub>2</sub> sur le cycle de vie :

	Moteur IE2 neuf	Moteur IE1 reconditionné
	Tonnes d'équivalents CO <sub>2</sub>	
55 kW	31,7	35,5
450 kW	207	226

# 94%

*c'est le taux de recyclabilité d'un moteur électrique qui ne laisse que 6% de déchets résiduels*

## Analyse de contribution du reconditionnement d'un moteur 55 kW



Ce graphique permet de mettre en lumière l'impact sur chacun des indicateurs de toutes les étapes du reconditionnement d'un moteur (appelée phase de fabrication). On constate notamment que :

**1** Les étapes de diagnostic et d'enlèvement du moteur ont un impact significatif sur la destruction de la couche d'ozone, l'oxydation photochimique et dans une moindre mesure sur réchauffement climatique.

**2** L'utilisation du cuivre lors de l'étape « bobinage » impacte significativement la quasi-totalité des indicateurs.

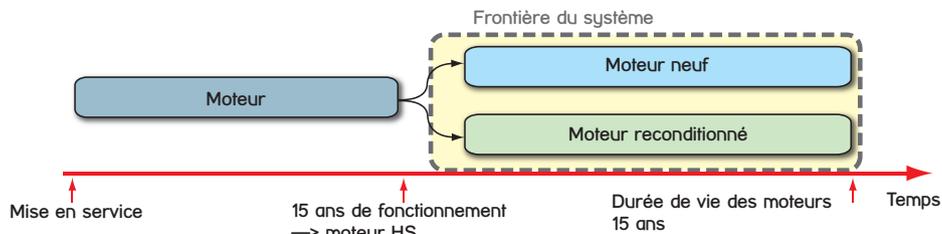
Cette étape est responsable de 100 % de l'épuisement des ressources naturelles et est très largement impactante sur 4 autres critères (acidification et toxicité de l'air, production de déchets toxiques, consommation d'eau).

**3** L'étape « remontage/essais » a un impact visible la toxicité et l'eutrophisation de l'eau ainsi que sur l'oxydation photochimique notamment lié à l'utilisation des vernis et peintures.



# Analyse comparative moteur neuf/reconditionné

L'objet de cette analyse est de comparer chaque étape du cycle de vie (fabrication ou reconditionnement /distribution/utilisation/fin de vie) d'un moteur neuf et d'un moteur reconditionné.



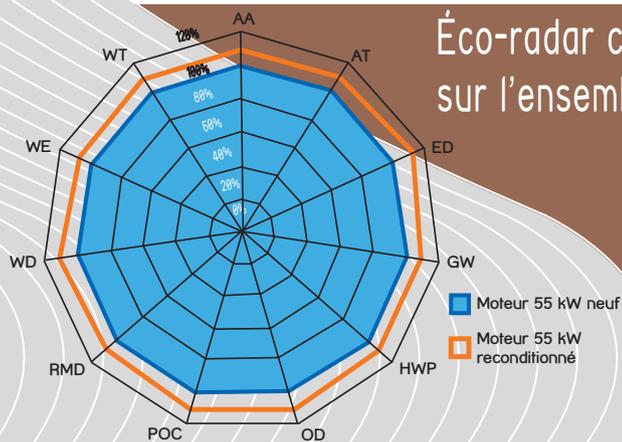
## ► Hypothèses de base de l'étude

**Le moteur neuf est un moteur de type IE2. Le moteur reconditionné est de type IE1.**

Ce choix a été fait en considération du fait qu'il s'agit de la situation la plus courante aujourd'hui : un moteur de type IE1 tombant en panne est remplacé par un moteur de type IE2. Il s'agissait donc d'avoir un éclairage le plus proche possible de la réalité. Néanmoins ce choix comporte deux inconvénients :

- La phase d'utilisation étant celle qui génère largement le plus d'impact sur tous les indicateurs, l'écobilan du moteur reconditionné est déséquilibré. Le recours à une analyse de sensibilité pour étudier les écobilans à technologie de moteur constante fait apparaître des résultats très différents (cf. p. 16 et 17).
- L'importance de la phase d'utilisation fait que toutes les variations dans les autres phases apparaissent quasiment imperceptibles et peuvent échapper à une lecture rapide des graphiques. Elles sont néanmoins bien réelles.

## Éco-radar comparatif d'un moteur neuf et reconditionné sur l'ensemble du cycle de vie

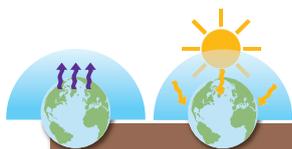


Sur l'ensemble du cycle de vie, le moteur neuf génère moins d'impact que le moteur reconditionné. Néanmoins ce résultat doit être nuancé : en effet, les technologies des deux moteurs ne sont pas équivalentes (moteur neuf plus performant en rendement) ce qui influence la phase d'utilisation qui est responsable de la majeure partie des impacts environnementaux.

## Moteur neuf IE2

## Moteur reconditionné IE1

### Fabrication / Reconditionnement



Exemple : Impact sur le réchauffement climatique :

7,35 tonnes eq. CO<sub>2</sub>

749 kg eq. CO<sub>2</sub>

de -49 % à -90 % d'impact sur 10 des 11 indicateurs étudiés. Sur le 11<sup>ème</sup> critère (épuisement des ressources naturelles), le moteur reconditionné est moins impactant également mais la différence est faible (5 %).

Cette différence est due à la quantité de matière bien moins importante nécessaire pour le reconditionnement d'un moteur comparé aux matières mises en œuvre pour sa fabrication.

### Distribution



Exemple : Impact sur le réchauffement climatique :

581 Kg CO<sub>2</sub> eq.

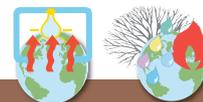
23.7 Kg CO<sub>2</sub> eq.

20 fois moins d'impact sur chacun des 11 indicateurs étudiés. Cela est lié notamment à la distance de transport plus faible en cas de reconditionnement.

### Utilisation

13 % de moins sur les 11 indicateurs étudiés.

Cela est lié à la différence de technologie entre les 2 moteurs étudiés (IE2/IE1). Le moteur reconditionné présente dès sa conception des pertes supérieures qui impactent la phase d'utilisation.



Exemple : Impact sur la consommation d'énergie :

19,6 millions MJ

22,2 millions MJ

### fin de vie



Exemple : Production de déchets dangereux :

1,32 Kg

0.33 Kg

4 fois moins d'impact sur chacun des 11 indicateurs étudiés. Cette différence est due au fait que le reconditionnement peut être répété alors que le remplacement ne s'opère qu'une fois.



# Analyses de sensibilité

Cette étude a été réalisée selon un scénario de base où le moteur neuf (fabrication Brésil, dont le mode de production d'électricité est comparable avec l'Europe) est de technologie IE2 et a une durée de vie de 15 ans.

Le moteur reconditionné est, quant à lui, un moteur IE1 et la réparation prolonge sa durée de vie de 15 ans. Les analyses de sensibilité permettent de faire varier ces hypothèses afin d'en mesurer l'importance.

## TECHNOLOGIE DU MOTEUR

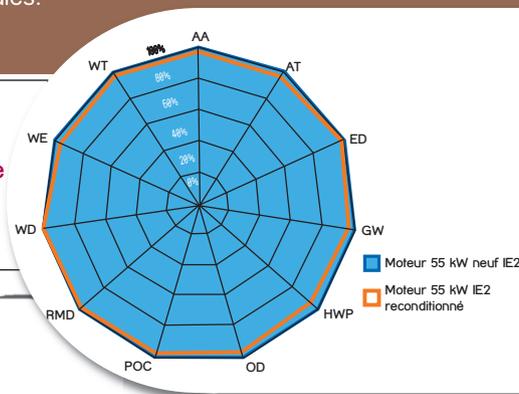
Cette analyse permet de comparer, à technologie égale, l'impact environnemental de la réparation et celui du remplacement par un moteur neuf.



*A technologie égale, la réparation d'un moteur a moins d'impact sur l'environnement que son remplacement par un moteur neuf.*

En comparant une technologie identique, le moteur reconditionné affiche un impact plus limité sur l'environnement que le moteur neuf, et ce sur tous les indicateurs étudiés.

Exemple :  
Sur l'indicateur de réchauffement climatique (GW), le gain est de 7,27 tonnes eq. CO<sub>2</sub>.



## DURÉE DE VIE DE LA RÉPARATION

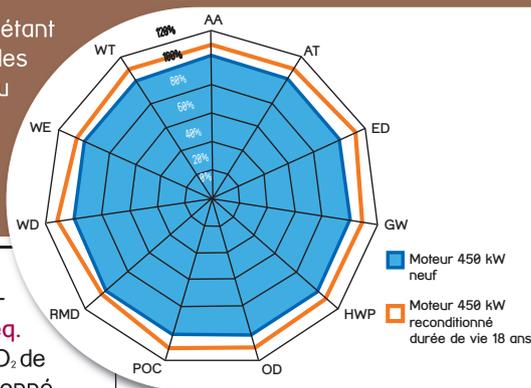
Cette analyse permet de voir les effets sur l'environnement lorsque la réparation ne prolonge la durée de vie du moteur que de 12 ans ou inversement de 18 ans.



Un allongement  
ou une réduction de 3 ans  
de la durée de vie du  
moteur reconditionné  
a un impact très faible  
sur l'impact global.

L'impact de la phase d'utilisation étant beaucoup plus fort que celui des autres phases, un allongement ou une réduction de 3 ans de la durée de vie du moteur reconditionné n'a pas d'impact significatif par rapport au scénario de référence.

Exemple : Un rallongement de 3 ans de la durée de vie du moteur de 450 kW reconditionné (18 ans) permet **un gain de 135 kg eq. CO<sub>2</sub>**, à comparer avec les 226 tonnes eq. CO<sub>2</sub> de l'ensemble de l'impact d'un moteur reconditionné.



## LIEU DE FABRICATION DU MOTEUR

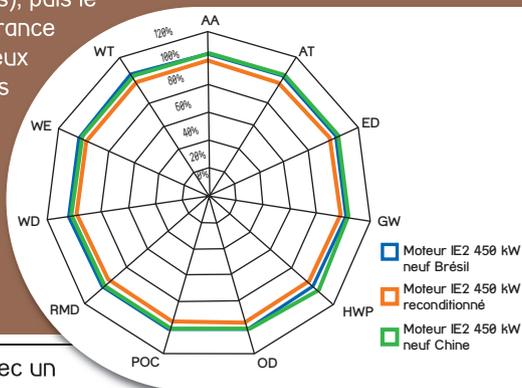
Ce scénario vise à vérifier l'importance du lieu de fabrication du moteur neuf au regard des indicateurs environnementaux.



Au regard de  
l'ensemble du cycle de vie,  
le lieu de production a un  
impact assez faible sauf du  
point de vue du réchauffement  
climatique et de la  
production de déchets  
dangereux.

La fabrication en Chine, dont le mode de production d'électricité, plus polluant que celui du Brésil (proche du modèle français), puis le transport du moteur jusqu'en France entraîne une détérioration de deux indicateurs (production de déchets dangereux - HWP - et réchauffement climatique - GW). Toutefois compte-tenu de la prépondérance de la phase d'utilisation (inchangée quel que soit le lieu de production du moteur), les variations de l'impact global sont faibles.

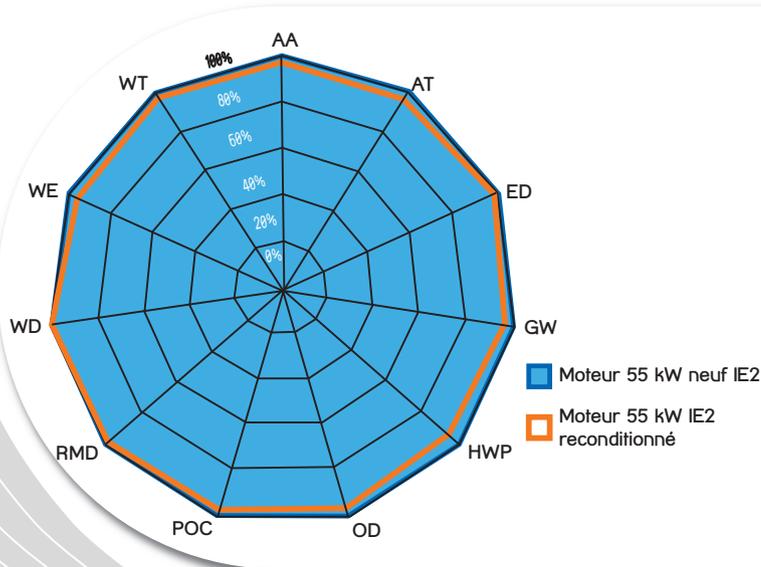
Exemple : Un moteur de 450 kW fabriqué avec un mode de production d'électricité chinois émet une tonne eq. CO<sub>2</sub> de plus qu'avec un mode européen ou semblable (Brésil). A comparer avec les 208 tonnes eq. CO<sub>2</sub> de l'ensemble de l'impact d'un moteur neuf...





# Conclusion de l'écobilan de la réparation de moteurs

Un moteur reconditionné a moins d'impact sur l'environnement qu'un moteur neuf de même technologie



Cette affirmation semble en contradiction avec les résultats affichés par le scénario de référence de cette étude, néanmoins une analyse approfondie permet de comprendre cette contradiction qui n'est qu'apparente.

En effet, le scénario est basé sur la comparaison de deux moteurs de technologies différentes : un moteur IE1 de départ qui dans le premier cas est réparé et conserve son rendement, et qui dans le deuxième cas est remplacé par un moteur de type IE2 (désormais obligatoire depuis juin 2011) donc de meilleur rendement.

Ce différentiel de rendement entre ces deux moteurs a un impact important. L'impact environnemental pré-

pondérant de la phase d'utilisation du moteur masque les gains engendrés par le reconditionnement.

L'analyse comparant un moteur neuf et un moteur réparé de même technologie vient supprimer cet "effet écran" et dès lors les gains environnementaux liés à la réparation apparaissent très nettement (cf. éco radar).

## La phase d'utilisation du moteur est celle qui a le plus grand impact environnemental

Le scénario de référence le démontre très clairement. Si l'on découpe le cycle de vie d'un moteur en quatre phases, (fabrication, distribution, utilisation et fin de vie) et que l'on analyse séparément ces phases, il apparaît que, quel que soit l'indicateur environnemental considéré, la phase d'utilisation est la plus contributrice à l'impact global (de 73 % à 99 %). Cette prédominance relègue au deuxième plan les trois autres phases et peut entraîner une vision déformée de l'analyse (cf. p. 18).

Par ailleurs, les analyses de sensibilité menées viennent confirmer cette prédominance de la phase d'utilisation. De fait, lorsque l'on fait varier des hypothèses dont les effets se produisent hors de la phase d'utilisation (ce qui est le

cas à la fois de l'allongement la durée de vie et de la modification du lieu de fabrication), l'impact global ne s'en trouve que très peu modifié. Inversement, une variation même faible de rendement (ce qui affecte la phase d'utilisation) entraîne des conséquences très importantes sur l'impact environnemental global.

Il ressort donc nettement de cette étude que le rendement du moteur est un élément décisif concernant l'impact sur l'environnement. Le reconditionnement d'un moteur ne dégradant pas ce rendement, il présente, à technologie égale, un meilleur écobilan qu'un moteur neuf (lié à un plus grand impact du moteur neuf lors des phases de fabrication et de transport notamment).



### Indicateur réchauffement climatique (GW) selon la phase de cycle de vie

	Fabrication	Distribution	Utilisation	Fin de vie
Moteur neuf IE2 (Kg eq CO <sub>2</sub> )	1 410	91	30 150	25
Moteur reconditionné IE1 (Kg eq CO <sub>2</sub> )	228	2,6	35 010	6,27



Agir pour l'efficacité énergétique,  
c'est d'abord évaluer son propre impact  
sur l'environnement.

# Les transformateurs

The background features a grey-to-white gradient on the left side, transitioning into a series of concentric, golden-yellow lines that curve across the right side of the image. The lines are closely spaced and create a sense of depth and movement.



# Aspects significatifs pour les transformateurs

L'objectif de cette étude est de comparer le cycle de vie des transformateurs neufs, des transformateurs révisés (pas de rebobinage - transformateur de 100 MVA) et des transformateurs reconditionnés (reconditionnement complet avec rebobinage de - transformateur 1250 kVA). Cette étude fait ressortir un certain nombre de constantes :

- ▶ **L'étape d'utilisation** est responsable de la majorité des impacts sur les 11 indicateurs (de 54 % à 99 %). La production de l'énergie électrique consommée par le moteur pendant la phase d'utilisation (due notamment aux pertes par effet joule) joue un rôle majeur.
- ▶ **La phase de fabrication (ou de reconditionnement pour les transformateurs réparés)** contribue de manière significative à l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles, du fait de la grande quantité de cuivre utilisée. A noter toutefois que pour une révision simple (transformateur de 100 MVA), la phase de fabrication (reconditionnement) est très peu impactante y compris pour l'épuisement des ressources naturelles.
- ▶ **Les phases de distribution et de fin de vie** sont des contributeurs mineurs à tous les indicateurs.

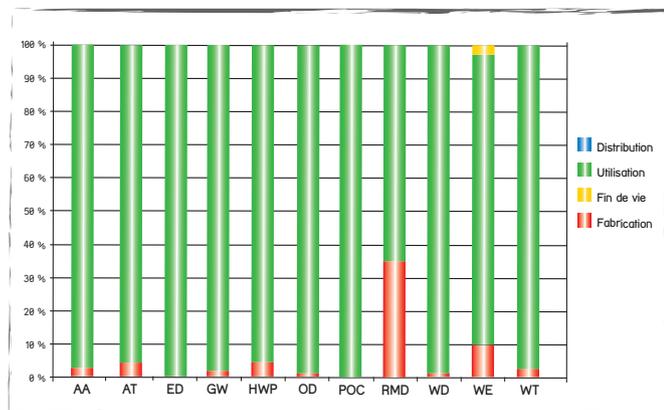
Empreinte CO<sub>2</sub> sur le cycle de vie :

	Transformateur neuf	Transformateur révisé	Transformateur reconditionné
	Tonnes d'équivalents CO <sub>2</sub>		
100 MVA	7 260	3 512	-
1250 kVA	446	-	1 250

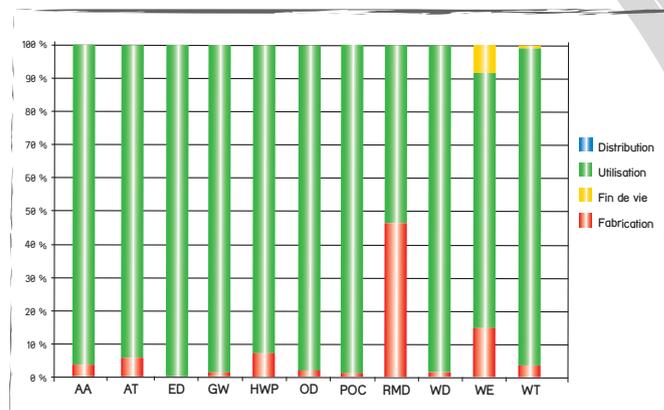
**86 %**

c'est le taux de recyclabilité d'un transformateur électrique de 1250 kVA qui ne laisse que 5 % de déchets résiduels

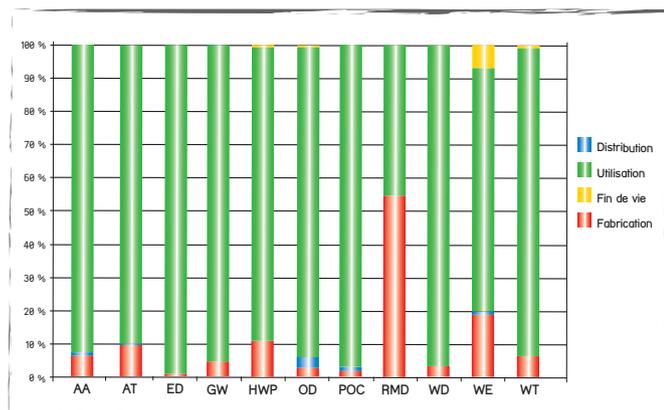
## Contribution de chaque phase du cycle de vie à l'impact environnemental global



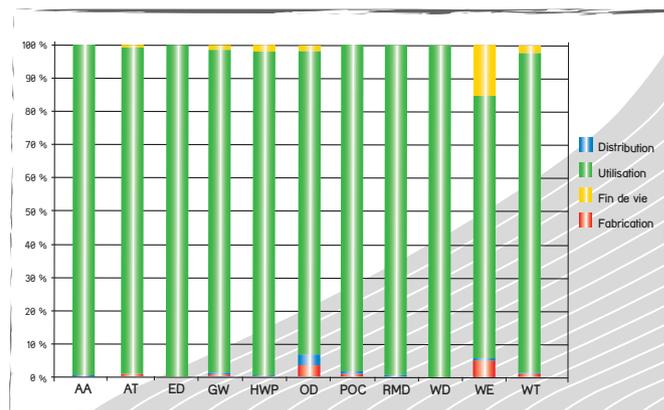
Transformateur 1250 kVA neuf (sur 30 ans)



Transformateur 1250 kVA reconditionné (sur 10 ans)



Transformateur 100 MVA neuf



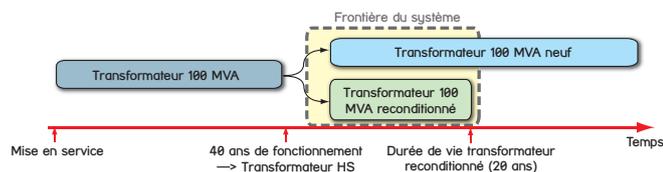
Transformateur 100 MVA révisé



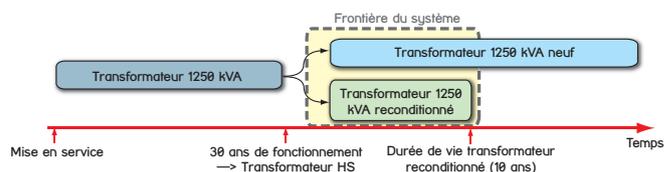
# Analyse comparative transformateur neuf/reconditionné

L'objet de cette analyse est de comparer chaque étape du cycle de vie (fabrication ou reconditionnement /distribution/utilisation/fin de vie) d'un transformateur neuf par rapport à un transformateur révisé (100 MVA) et un transformateur reconditionné (1250 kVA).

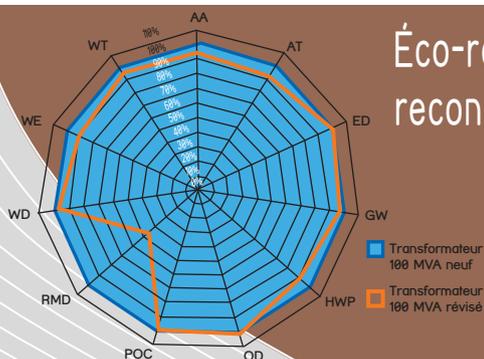
## Transformateur révisé (100 MVA)



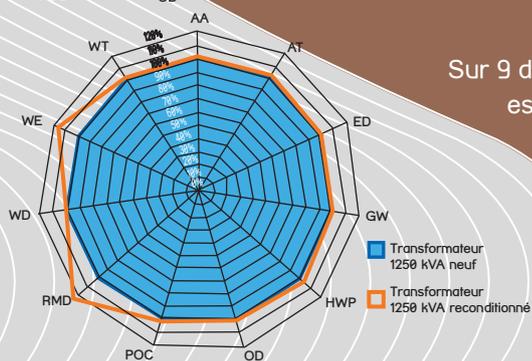
## Transformateur reconditionné (1250 kVA)



## Éco-radar comparatif d'un transformateur neuf, révisé et reconditionné sur l'ensemble du cycle de vie



Le transformateur 100 MVA présente moins d'impact sur 7 des 11 indicateurs et les 4 autres étant identiques. Le transformateur révisé contribue ainsi près de 2 fois moins à l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles - RMD, du fait de l'absence de rebobinage (donc pas d'utilisation de cuivre).



Sur 9 des 11 indicateurs, l'impact du transformateur 1250 kVA reconditionné est identique au neuf. Le rebobinage d'une partie du transformateur est responsable de l'aggravation de l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles - RMD (cuivre). Par ailleurs, l'incinération d'une partie de l'huile remplacée est responsable de l'impact plus important sur l'eutrophisation de l'eau - WE.

## Transformateur révisé

### Fabrication / Reconditionnement

de -33 % à -100 % sur tous les indicateurs environnementaux sauf celui de la destruction de la couche d'ozone.

La phase de fabrication est significativement plus impactante pour un transformateur neuf du fait de la moindre quantité de matière mise en œuvre pour la révision.

### Distribution

de -5 % à -45 % sur 5 indicateurs (notamment -45 % pour l'acidification de l'air et -34 % pour la toxicité de l'air).

Sur ces 2 indicateurs, les variations sont dues à l'utilisation de l'avion pour le personnel effectuant la mise en service du transformateur neuf.

### Utilisation

Les impacts liés aux phases d'utilisation des transformateurs neufs, révisés ou reconditionnés sont identiques car les pertes par effet joule sont équivalentes pour les types de transformateurs.

### fin de vie

Les impacts liés aux phases de fin de vie des transformateurs neufs, révisés ou reconditionnés sont identiques car les pertes par effet joule sont équivalentes pour les types de transformateurs.

## Transformateur reconditionné

-39 % de consommation d'énergie et -21% d'impact sur le réchauffement climatique.

Sur les 9 autres critères, le transformateur reconditionné est plus impactant que le transformateur neuf.

Sur les 11 critères, le transformateur reconditionné est plus impactant que le neuf de 33 %, lors de la phase de distribution.

## Transformateur neuf

● Vs. Révision : Le transformateur neuf présente beaucoup plus d'impacts que le transformateur révisé sauf sur l'indicateur de destruction de la couche d'ozone (-41 %). Cela est dû à la plus grande distance parcourue en convoi exceptionnel par le transformateur révisé.

● Vs. Reconditionnement : de 17 % à 106 % sur les 9 autres critères (hors consommation d'énergie et réchauffement climatique). En effet, la durée de vie retenue pour le transformateur reconditionné est de 10 ans alors que celle du transformateur neuf est estimée à 30 ans.

● Vs. Révision : Le transformateur neuf présente moins d'impacts que le transformateur révisé sur 6 indicateurs. A noter, plus particulièrement l'indicateur de production de déchets dangereux (+74 % pour le transformateur reconditionné) et celui la consommation d'eau (+57 %).

● Vs. Reconditionnement : -33 % d'impact sur tous les indicateurs pour le neuf. Cette différence est à lier avec les durées de vie relatives retenues pour les transformateurs neuf et reconditionné (30 ans et 10 ans) : rapportées à l'unité fonctionnelle de l'étude, ces durées de vie expliquent les variations lors de la phase de distribution.





# Analyse de sensibilité sur la durée de vie

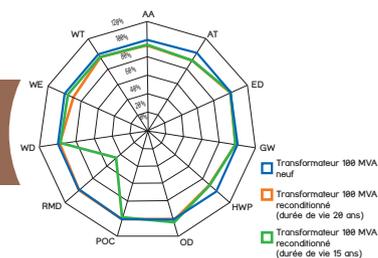
Les analyses de sensibilité permettent de faire varier les durées de vie attribuées à la révision et au reconditionnement des transformateurs en regard de la durée de vie du transformateur neuf (30 ans pour le transformateur 1250 kVA et 40 ans pour transformateur 100 MVA).

## DURÉE DE VIE DE LA RÉVISION

La durée de vie de référence retenue pour le transformateur 100 MVA neuf est de 40 ans, rallongée de 20 ans après la révision complète. Cette analyse fait varier la durée de vie du transformateur révisé à 5 ans et 15 ans. Enfin, une dernière hypothèse fait diminuer la durée de vie du transformateur neuf à 30 ans en maintenant le transformateur révisé à 20 ans.

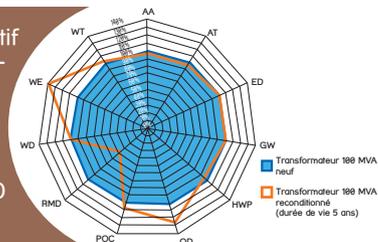
Neuf 40 ans  
Révision 15 ans

En faisant baisser la durée de vie du transformateur révisé de 5 ans (de 20 ans à 15 ans), on n'observe pas de changements significatifs.



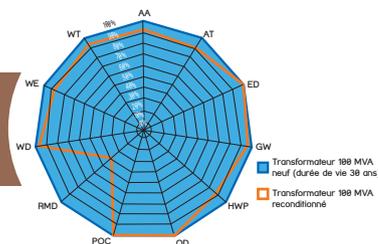
Neuf 40 ans  
Révision 5 ans

Pour une durée de vie très courte (5 ans), un impact significatif apparaît sur deux indicateurs : destruction de la couche d'ozone - OD (+24 % par rapport au transformateur révisé durée 20 ans) liée au transport et l'eutrophisation de l'eau - WE (+48 %) liée à l'incinération des huiles usagées. En revanche, même avec une très courte durée de vie le transformateur révisé a un impact deux fois plus faible sur l'épuisement des ressources naturelles - RMD que le neuf.



Neuf 30 ans  
Révision 20 ans

Ramener la durée de vie du transformateur neuf à 30 ans ne génère pas de différence importante, mais rend plus significatifs les écarts en faveur du transformateur révisé.

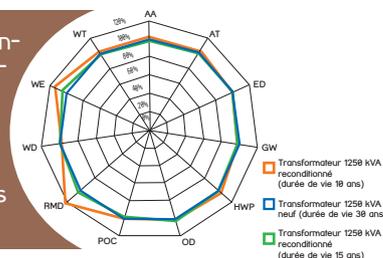


## DURÉE DE VIE DU RECONDITIONNEMENT

La durée de vie de référence retenue pour le transformateur 1250 kVA neuf est de 30 ans, rallongée de 10 ans après son reconditionnement. Cette analyse augmente la durée de vie du transformateur reconditionné à 15 ans puis 20 ans.

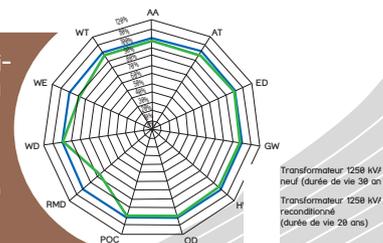
Neuf 30 ans  
Reconditionnement  
15 ans

L'allongement de la durée de vie du transformateur reconditionné de 5 ans entraîne une variation d'impact significative sur l'indicateur de consommation de ressources naturelles (RMD). Sur les autres indicateurs, la variation est inférieure à 20 %. En comparaison avec un transformateur neuf, un transformateur reconditionné pour 15 ans est toujours très légèrement impactant mais dans des proportions non-significatives.



Neuf 30 ans  
Reconditionnement  
20 ans

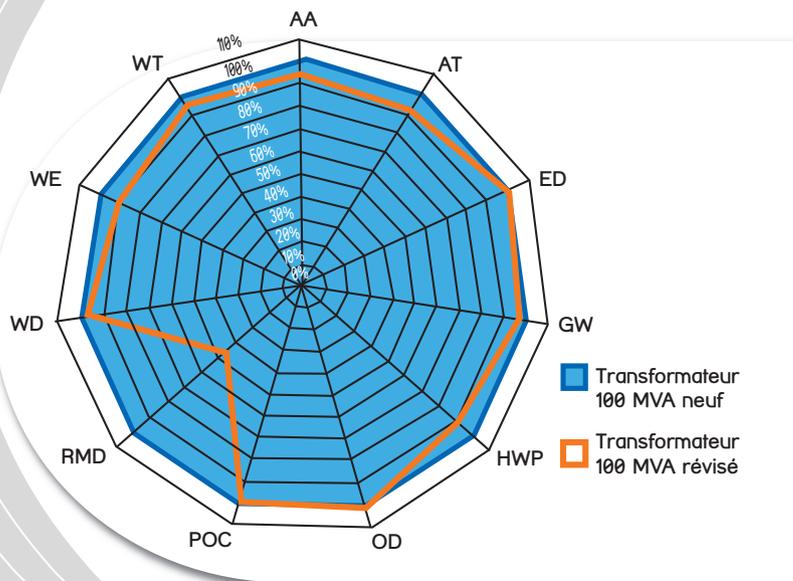
La variation de la durée de vie du transformateur reconditionné à 20 ans entraîne une variation significative sur la consommation de ressources naturelles et sur l'eutrophisation de l'eau. Par rapport au transformateur neuf, l'empreinte du transformateur reconditionné devient meilleure que celle du neuf voire significativement meilleure (-23 %) sur l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles.





# Conclusion de l'écobilan de la réparation de transformateurs

La révision d'un transformateur présente moins d'impact sur l'environnement que son remplacement



Cela est vrai sur tous les indicateurs étudiés mais l'élément le plus marquant est l'impact sur l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles (RMD) qui est divisé par deux dans le cas d'une révision. En effet, l'absence de rebobinage et donc d'utilisation de cuivre influe de manière déterminante sur l'écobilan.

Il est intéressant de noter que même lorsque l'on diminue la durée de vie de la réparation, cet indicateur demeure inchangé et les gains engendrés demeurent.

Par ailleurs, lorsque la durée de vie à l'issue de la révision est très courte, l'indicateur de destruction de la couche d'ozone se dégrade fortement.

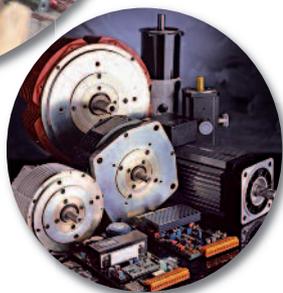
Le reconditionnement (avec bobinage) d'un transformateur présente un impact similaire à un transformateur neuf sur la plupart des indicateurs

Néanmoins, sur deux indicateurs sur 11, cet impact est plus important : c'est le cas de la consommation de ressources naturelles (du fait des quantités importantes de cuivre utilisées rapportées à la durée de vie réduite), mais aussi de l'eutrophisation de l'eau (liée au traitement des huiles usagées).

A noter toutefois, que dès lors que la durée de vie du transformateur reconditionné dépasse 19 ans, les gains environnementaux deviennent significatifs notamment sur l'indicateur de l'épuisement des ressources naturelles.

## La phase d'utilisation du transformateur est celle qui a le plus grand impact environnemental

De la même manière que pour les moteurs, l'aspect environnemental significatif majeur pour les transformateurs, qu'ils soient neufs, révisés ou reconditionnés est lié à la production d'énergie consommée durant la phase d'utilisation. L'utilisation du cuivre pour la phase de fabrication / reconditionnement impacte, pour sa part, fortement l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles.



## La nécessité d'une vision au cas par cas

Chaque installation industrielle et chaque transformateur constituent une exception. Ainsi, s'il est possible de tirer certaines conclusions générales sur le plan environnemental des bénéfiques comparés d'une révision, d'un reconditionnement ou d'un remplacement, il est impossible d'en faire une généralité.

En effet, les différences mises en lumière ne sont pas assez significatives pour induire des conclusions immuables. Si la révision simple est clairement moins impactante pour l'environnement, il n'en reste pas moins que des impératifs techniques ou de délais peuvent la rendre inopérante. Quant au reconditionnement et au remplacement, la comparaison de leur écobilan est mitigée. Là encore, des paramètres, autres qu'environnementaux, pourront influencer sur le choix retenu.



# L'Écobilan Sirmelec/Ademe de la réparation de matériel électrique

## Rapports complets



Les rapports complets sont disponibles sur demande auprès du Délégué général du Sirmelec : [ykassianides@sirmelec.fr](mailto:ykassianides@sirmelec.fr)

Crédits photos :  
© Beboy - Fotolia.com ;  
© gmg9130 - Fotolia.com ;  
© zvirgzds - Fotolia.com ;  
© Dmitry Naumov - Fotolia.com ;  
© gmg9130 - Fotolia.com ;  
© philhol - Fotolia.com ;  
© benamalice - Fotolia.com  
© yuryrumovsky - Fotolia.com



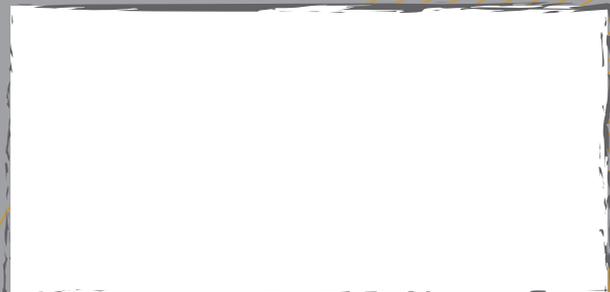
SIRMELEC

SERVICE & MAINTENANCE  
DE MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Groupement des entreprises de service et de maintenance de matériel électrique

[www.sirmelec.fr](http://www.sirmelec.fr)

*Cachet de l'entreprise*



*Adhérent du SIRMELEC*