



Pôlenergie

La Newsletter



@POLENERGIE

POLENERGIE.ORG

OPTIMISATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES



EDITO

L'attention portée aux moteurs électriques constitue une réelle source d'économie pour l'industrie. D'abord parce qu'ils sont les lieux où s'interroger sur l'efficacité énergétique mais aussi parce qu'à travers cette attention se mettent peu à peu en place de meilleures pratiques sur leur maintenance et sur leur usage sobre. À terme, ce suivi des moteurs électriques participe aux économies de CAPEX de l'entreprise. Chez Aluminium Dunkerque, on dénombre plus de 1000 moteurs électriques avec une centaine de référence, de différentes puissances allant de quelque kW à 900kW (moteur des compresseurs). On retrouve ces équipements dans de multiples applications tel que les pompes, la ventilation... Ces équipements sont intégrés dans un plan de suivi pour la maintenance préventive et curative. A chaque problématique rencontrée sur ces moteurs, une évaluation précise est réalisée afin de trouver la solution la plus pertinente, à savoir une remise en état, ou le remplacement de l'équipement par un appareil plus efficient en énergie.

Leur foisonnement au sein de l'usine fait que ce suivi est un travail quasi sans fin mais qui fait partie de ces quick wins qu'il serait dommage de ne pas utiliser pour diminuer nos postes de dépense.

La démarche de Pôlénergie, associée au CETIM et à Schneider Electric est donc tout à fait bienvenue. Sur la même ligne que le livret Decarbotex qui cible l'industrie textile, ce hors-série montre la capacité de préconisation des équipes de Pôlénergie pour tout type d'industrie sur les questions énergétiques et de décarbonation. A côté des projets conséquents en Capex pour la décarbonation, s'intéresser aux gestes simples et quotidiens qui jouent un rôle sur les factures des industriels me semble être un réel signe de compétence et d'implication des équipes de Pôlénergie. Qu'il devienne le livre de chevet de tous les responsables d'ateliers de production des Hauts-de-France! Un grand merci aux équipes de Pôlénergie pour leur engagement à la décarbonation et aux économies d'énergie de nos industries !

Laurent Courtois,
Directeur Energie Climat chez
Aluminium Dunkerque





Contexte et enjeu	03
Choix des moteurs : fonction et typologie	05
Sobriété et efficacité dans les moteurs : ça veut dire quoi ?	09
1. Sobriété énergétique	09
2. Efficacité énergétique	10
3. Optimisation des transmissions	12
4. Maintenance et exploitation	14
Financement	17
Conclusion	18

Contexte et enjeu



L'énergie est consommée dans chaque secteur, qu'il s'agisse du résidentiel-tertiaire, des transports, de l'industrie ou de l'agriculture. Cependant, chacun présente des modes et des niveaux de consommation qui lui sont propres. Avant d'examiner en détail l'utilisation des moteurs électriques dans l'industrie, il est essentiel de comprendre le mix énergétique de ce secteur ainsi que ses stratégies de décarbonation.

L'industrie manufacturière représentait 20% des consommations énergétiques finales et 18% des émissions de gaz à effet de serre en France en 2020. C'est le 3ème secteur le plus consommateur d'énergie derrière le secteur résidentiel-tertiaire et les transports.¹

Ces dernières années, la consommation énergétique de l'industrie française a diminué, tandis que certains secteurs ont maintenu leur niveau de production. Cette évolution s'explique en partie par le développement d'innovations technologiques, l'intensification des efforts en efficacité énergétique ou encore le contexte économique (crises, délocalisations, etc.).

Actuellement, le gaz et l'électricité sont les principales sources d'énergie utilisées, représentant chacune 35 % de la consommation totale, soit à elles deux les deux tiers de la consommation énergétique. D'autres sources complètent ce mix, notamment les produits pétroliers, le charbon, les énergies renouvelables et de récupération ainsi que des combustibles spécifiques. Chaque filière industrielle possède son propre mix énergétique, et toutes ne consomment pas les mêmes volumes. Les réglementations carbone et environnementales incitent les industriels à adopter des pratiques plus durables. La transition du mix fossile vers des énergies renouvelables et vers l'électrification des procédés dépendra de la levée des incertitudes

économiques ou volumétriques, et de la persistance ou non des défis infrastructurels.

Il est important de noter que la définition d'une trajectoire de décarbonation pour un industriel se construit par étapes successives :

- 1** Evaluer ses usages en énergie et en matières, tout en adoptant des actions de sobriété
- 2** Réduire ses besoins grâce à l'investissement dans des équipements plus performants qui améliorent l'efficacité énergétique
- 3** Déployer des solutions pour substituer les consommations d'énergie fossile par des énergies décarbonées comme l'électricité, les gaz bas-carbone ou la biomasse
- 4** S'attaquer aux derniers gisements difficiles à éliminer par des méthodes de capture, de stockage ou d'utilisation du carbone.

Pour mieux comprendre la consommation électrique dans l'industrie, il faut savoir qu'elle s'élevait à 113 TWh en 2019, représentant environ un quart de la consommation totale d'électricité en France. Sa répartition² était la suivante :

- Industrie mécanique et métallurgique : 22 % ;
- Industrie chimique : 18 % ;
- Agroalimentaire : 18 % ;
- Sidérurgie : 10 % ;
- Minéraux et matériaux : 8 % ;
- Papier-carton : 7 % ;
- Construction automobile : 5 % ;
- Autres industries : 12 %.



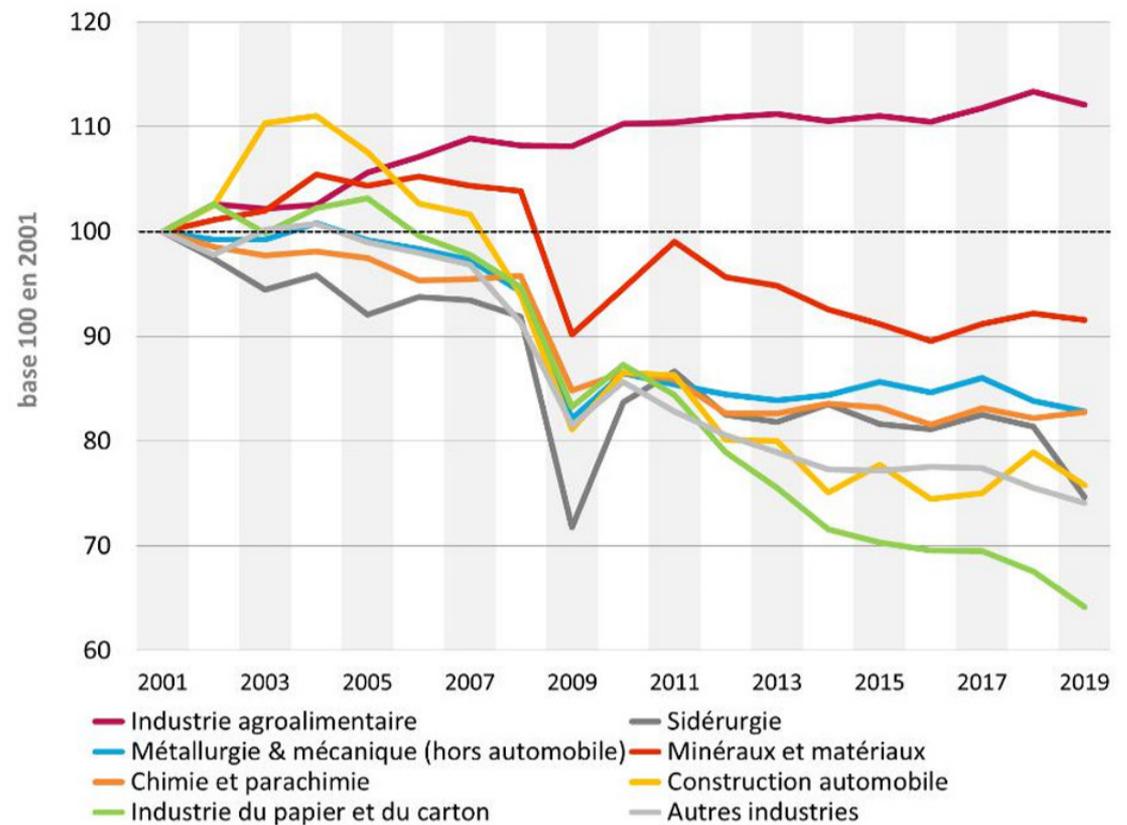
¹ SDES, Bilan énergétique de la France

² INSEE, enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie (EACEI) 2020

Evolutions comparées à la demande électrique des grandes branches industrielles

L'évolution de la consommation électrique industrielle en France au cours des 30 dernières années révèle des fluctuations façonnées par des facteurs économiques, technologiques et politiques. **Les baisses peuvent être expliquées par l'amélioration de l'efficacité énergétique, ou par l'impact des crises énergétiques : l'industrie possède un gisement d'économie important.** A l'opposé, les augmentations s'expliquent par la hausse de la production, la réindustrialisation ou encore l'électrification des procédés. Cette électrification est conditionnée par plusieurs paramètres, notamment la disponibilité des électrons, l'équilibrage du réseau, l'évolution des coûts des énergies (électricité et gaz), ainsi que de la taxe carbone.³

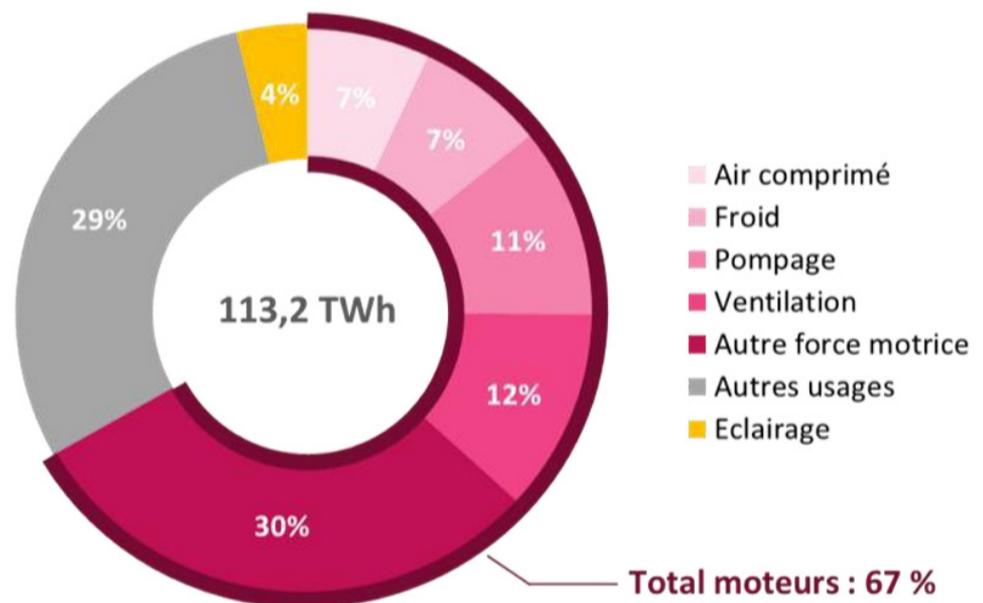
Face à ces défis, diminuer sa consommation d'énergie permet de limiter son exposition aux variations des prix du marché.



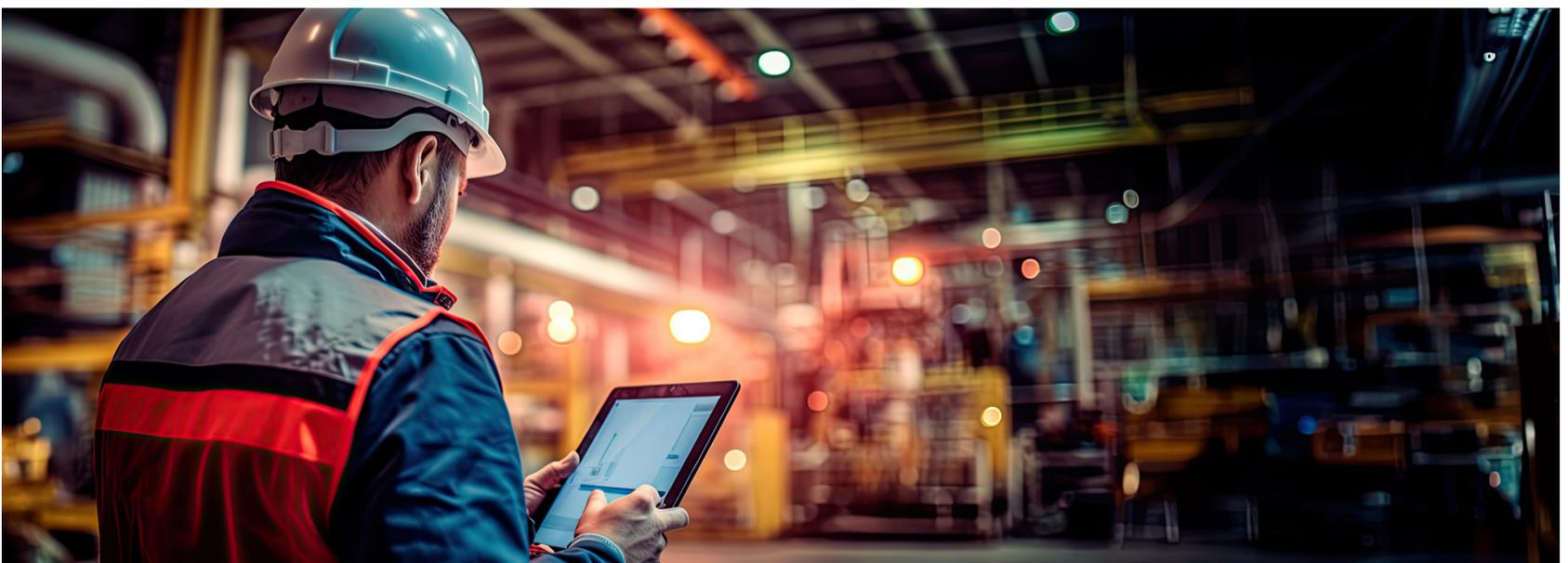
Répartition par usages de la demande électrique industrielle pour l'année 2019

Les moteurs consomment les 2/3 de l'électricité du secteur industriel. **Ils sont essentiels pour faire fonctionner diverses pièces mobiles ainsi que les équipements de ventilation, de pompage, de compression ou encore de mélange.** Le choix du moteur constitue un paramètre important pour les industriels afin d'optimiser la rentabilité et la longévité de l'équipement tout en minimisant les incidents techniques (surcharge ou dégradation rapide des roulements).

(Source : RTE - Trajectoire de consommation électrique du secteur industriel pour l'horizon 2050)



³ Observatoire électricité (O.I.E) la consommation d'énergie dans l'industrie en France



Choix des moteurs : fonction et typologie

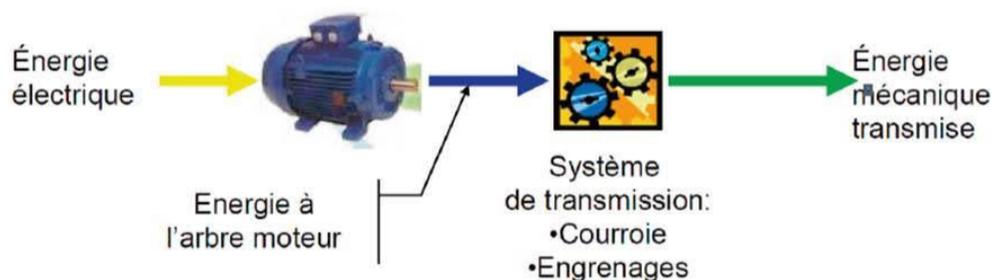


CETIM

La fonction des moteurs électriques est de convertir une énergie électrique en une énergie mécanique qui va, elle aussi, être transformée ou utilisée en direct. Les moteurs électriques peuvent être en prise directe avec le mouvement qu'ils ont à créer. On comprend d'ailleurs intuitivement que **ce mode de transmission est énergétiquement le plus économe** car il n'y a pas d'intermédiaire donc de pertes entre l'énergie mécanique fournie par le moteur et le besoin en énergie mécanique (de rotation dans ce cas) de l'équipement ainsi motorisé.

Mais, le plus souvent, cette conversion d'énergie mécanique nécessite un organe de transmission entre le moteur et l'équipement pour :

- Ajuster la vitesse de rotation du dispositif ;
- Ajuster le couple mécanique ou la puissance transmise ;
- Déporter le moteur vis-à-vis de l'axe d'entraînement de l'équipement pour des raisons d'encombrement ;
- Guider ou convertir le mouvement de rotation du moteur en un autre mouvement.



Rôle des systèmes de transmission

Source CETIM : Guide Maîtrise de l'énergie dans l'industrie mécanique

Un moteur électrique est constitué d'un enroulement de fils conducteurs, d'un stator et d'un rotor. Il peut être alimenté en courant monophasé ou triphasé, selon l'application et le type d'alimentation disponible. Selon les besoins, un moteur peut être alimenté par deux types de courant distincts : **le courant continu (DC - Direct Current) et le courant alternatif (AC - Alternating Current).**

Les **moteurs DC** sont privilégiés dans les applications nécessitant **un couple élevé dès le démarrage et une vitesse de rotation contrôlable avec précision**, comme dans les véhicules électriques ou certaines machines-outils. Toutefois, ils demandent une conversion

de l'AC en DC via un redresseur lorsqu'ils sont alimentés par le réseau.

En revanche, les **moteurs AC** sont plus répandus **en raison de leur efficacité énergétique, de leur robustesse et de leur faible besoin en maintenance.** Leur vitesse étant directement liée à la fréquence du réseau, un **variateur de fréquence** est souvent utilisé pour ajuster leur vitesse de rotation.

Les moteurs AC peuvent être classés selon deux critères distincts en fonction de :

1) Leur principe de fonctionnement : synchrone ou asynchrone

Les moteurs synchrones fonctionnent à une vitesse strictement proportionnelle à la fréquence du réseau, sans aucun glissement entre la vitesse du rotor et celle du champ magnétique tournant du stator. **Pour maintenir cette synchronisation, ils nécessitent une excitation spécifique, souvent assurée par des aimants permanents ou par un courant continu injecté dans le rotor.** En revanche, les moteurs asynchrones, aussi appelés moteurs à induction, présentent un léger décalage entre la vitesse du rotor et celle du champ tournant. Ce décalage, appelé glissement, dépend de la charge appliquée au moteur et est essentiel pour induire un courant dans le rotor par effet électromagnétique.

2) Leur type d'alimentation : monophasé ou triphasé

Les moteurs triphasés fonctionnent avec un courant alternatif triphasé, qui permet une meilleure transmission de puissance et une plus grande efficacité énergétique, ce qui les rend indispensables dans les infrastructures et équipements industriels. À l'inverse, **les moteurs monophasés sont généralement moins performants et moins puissants que leurs équivalents triphasés**, mais ils restent intéressants pour des applications où le triphasé est moins présent.

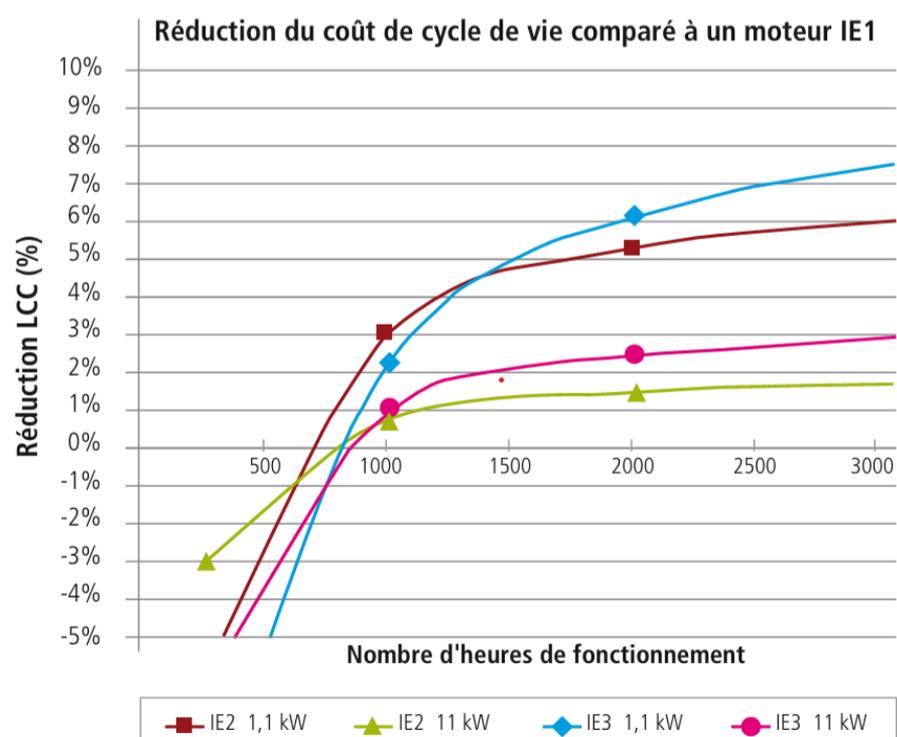


TYPE DE MOTEUR AC	MONOPHASÉ	TRIPHASÉ
<p style="text-align: center;">SYNCHROME</p>	<p>Applications :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Horloges de précision - Petits entraînements --> Équipements nécessitant une vitesse constante <p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse constante, indépendante de la charge - Bonne efficacité énergétique <p>Inconvénients :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un dispositif d'amorçage pour démarrer 	<p>Applications :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Industries lourdes (générateurs, compresseurs, pompes) - Éoliennes <p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rendement élevé - Précision de vitesse et de synchronisation - Bon contrôle via l'électronique de puissance <p>Inconvénients :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Complexité de pilotage (nécessite un onduleur pour la variation de vitesse) - système de démarrage spécifique
	<p style="text-align: center;">ASYNCHROME</p>	<p>Applications :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Électroménager (ventilateurs, compresseurs de réfrigérateur) - Pompes domestiques - Petits outils électriques <p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Simple et robuste - Peu coûteux - Peu d'entretien <p>Inconvénients :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Couple de démarrage plus faible

La durée de vie théorique d'un moteur électrique est de 20 ans ou plus. Cependant, certains peuvent être rapidement remplacés : environ 5 millions de moteurs sont installés en France et 650 000 unités sont renouvelées chaque année (13%).

Les nouvelles exigences peuvent augmenter le coût d'achat (CAPEX) et de maintenance du moteur, représentant actuellement entre moins de 10 % des dépenses totales. **En revanche, le coût énergétique (OPEX) sera lui réduit - représentant plus de 90%.** Le bon dimensionnement du moteur est donc fondamental pour minimiser les coûts de fonctionnement et l'impact sur l'environnement.

Source : Eco Conception des moteurs – généralités – Pôle Medee 2012



Données issues des études préparatoire de la Commission avec : prix HT du kWh : 0,075/kWh, Taux de charge du moteur 60% pendant 12 ans pour 1,1 kW et 15 ans pour 11 kW.

Pour réduire efficacement sa consommation d'énergie, il est essentiel de bien la connaître en analysant précisément les flux énergétiques de l'entreprise. Une telle démarche permet d'identifier les dérives invisibles, notamment celles liées à l'usage des moteurs électriques, et de quantifier les gains potentiels en optimisant leur fonctionnement. Une stratégie claire est donc nécessaire. (voir schéma à droite)

Les sections suivantes explorent différentes actions pouvant être mises en place pour optimiser l'utilisation des moteurs électriques. Elles abordent à la fois des stratégies de sobriété énergétique, visant à réduire la consommation superflue, et des mesures d'efficacité énergétiques, permettant d'améliorer leurs performances tout en limitant les pertes.

Chaque action est évaluée selon des critères spécifiques (investissements, gains énergétique et facilité de mise en œuvre) et une notation, permettant de prioriser les interventions en fonction de leur impact potentiel.



Sobriété et efficacité dans les moteurs : ça veut dire quoi ?



Faire preuve de sobriété ou d'efficacité énergétique revient à adopter une approche réfléchie et mesurée dans l'utilisation de l'énergie. Cela implique d'une part, **de s'assurer que les équipements et consommateurs énergétiques sont utilisés de manière optimale, sans gaspillage, et d'autre part, de dimensionner correctement la puissance en fonction des besoins réels.** Il ne s'agit pas de réduire la consommation d'énergie de manière brutale, mais de comprendre et d'évaluer précisément les exigences de chaque situation ou processus, afin de n'utiliser que l'énergie nécessaire. **Pour mettre en pratique cette approche de sobriété et d'efficacité énergétique, une analyse détaillée des consommations au plus fin pas horaire et à la plus fine maille possible doit être réalisée.** Voici quelques exemples d'actions et solutions concrètes pouvant être mises en place :

1. Sobriété énergétique

a. Choix du type de moteur : l'optimisation du choix entre un moteur synchrone et asynchrone joue un rôle clé dans la sobriété énergétique. **Les moteurs synchrones offrent un meilleur rendement et une consommation réduite** grâce à leur facteur de puissance élevé et l'absence de pertes par glissement. En revanche, **les moteurs asynchrones, bien que plus robustes et économiques, consomment davantage d'énergie en raison de ces pertes.** Il n'existe donc pas de solution universelle, le choix devant être optimisé en fonction des contraintes spécifiques de chaque usage.

Exemple : [Transport de bagages d'aéroport](#)

Une comparaison de fonctionnement a été réalisée entre un moteur asynchrone équipé d'un variateur et un moteur synchrone (sans changer le type de variateur). Une économie d'énergie de près de 30% a été observée lors d'essais.

Investissement

Gain énergie

Facilité de mise en oeuvre



b. Optimisation du dimensionnement : il est nécessaire de s'assurer que les moteurs soient correctement dimensionnés en fonction de la charge réelle. **Un moteur surdimensionné fonctionne souvent à charge partielle, ce qui entraîne une efficacité réduite et une augmentation des pertes par effet Joule.** Un moteur correctement dimensionné fonctionne plus proche de son rendement optimal, minimisant les pertes d'énergie et réduisant l'usure. Il est donc question d'adapter la puissance à la charge. Il est aussi pertinent d'utiliser des moteurs adaptés à des applications précises - par exemple installer deux moteurs de puissance plus faible plutôt qu'un seul moteur dont la puissance équivaut à la somme des deux plus petits. **Il peut être pertinent de mettre en place une stratégie de gestion pour éviter que les moteurs tournent à vide ou fonctionnent inutilement pendant les périodes d'inactivité.**

Exemple : Industrie textile

Problématique : Surdimensionnement courant dans les machines à tisser

Solution : Mise en place de moteurs de puissance adaptée

Investissement

Gain énergie

Facilité de mise en oeuvre



c. Arrêt des moteurs (veille, talon de consommation) : le talon de consommation correspond à l'énergie consommée par l'entreprise en période d'inactivité (c'est-à-dire le soir, le week-end, pendant les vacances ou les périodes de maintenance). Ce talon concerne à la fois le thermique ainsi que l'électrique et peut, dans certains cas, être non négligeable, représentant ainsi des dépenses inutiles. En général, **le talon électrique est généré par le maintien en chauffe du bâtiment, par l'énergie consommée par la veille des machines/équipements de production ou de sécurité,** certains devant

rester sous tension en permanence. Certains compresseurs doivent rester sous tension afin de compenser les fuites d'air comprimé, le non-asservissement des systèmes de ventilation, des groupes froids, des circulateurs de réseaux de chauffage à eau ou encore plus généralement des moteurs utilisés dans les processus industriels, comme le pompage.



Une réduction, voire un arrêt, des moteurs adressables pourrait être envisagée lors de ces périodes de non-production ou de faible demande.

Investissement

Gain énergie

Facilité de mise en oeuvre



2. Efficacité énergétique :

a. Technologies : les moteurs électriques sont soumis à plusieurs normes qui définissent leurs caractéristiques, leurs performances et leur efficacité énergétique. La norme **IEC 60034 - Norme de référence pour les moteurs électriques** (Commission Électrotechnique Internationale) est la référence principale pour la classification des moteurs électriques. Elle couvre plusieurs aspects :

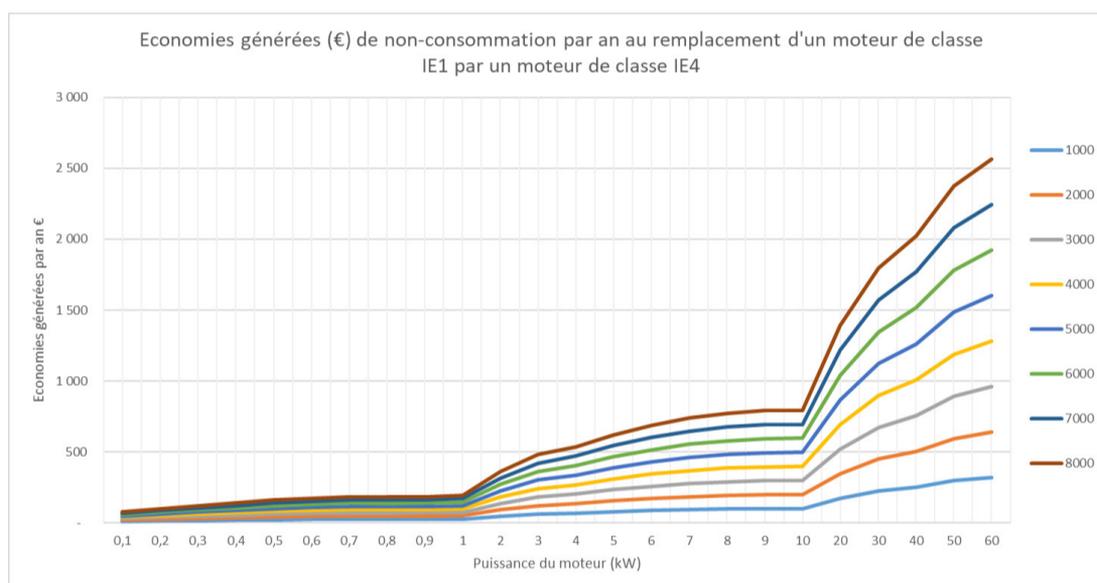
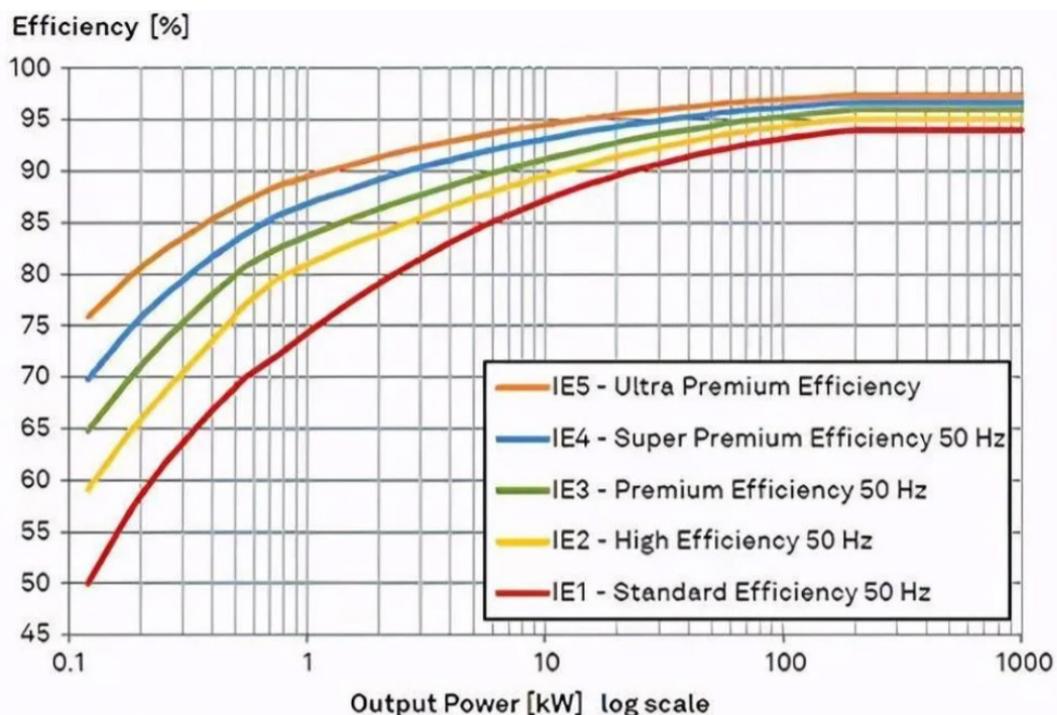
- **Puissances normalisées :** Les moteurs sont définis par des puissances standardisées (ex. : 0,37 kW, 0,75 kW, 1,5 kW, 3 kW, etc.), garantissant l'interchangeabilité entre fabricants.
- **Tensions et fréquences normalisées :** Elle définit les tensions d'alimentation standards (400V, 690V en triphasé) et les fréquences (50 Hz en Europe, 60 Hz en Amérique du Nord).
- **Classes thermiques et températures de fonctionnement :** Classification des enroulements selon leur capacité à supporter la chaleur (ex. : classes B, F, H).
- **Protection et refroidissement :** classification IP (Indice de Protection) et méthodes de refroidissement (IC410, IC411...).

La norme **IEC 60034-30** établit des classes de rendement énergétique :

- **IE1 : Rendement standard** (ancienne génération, en voie de disparition)
- **IE2 : Rendement amélioré**
- **IE3 : Haut rendement** (obligatoire dans l'UE depuis 2017 pour certains moteurs)
- **IE4 : Très haut rendement** (encore en déploiement, moteurs plus coûteux mais plus efficaces)

Une cinquième classe, l'IE5 Classe «Ultra Premium», a récemment été développée par les constructeurs. Depuis janvier 2017, chaque moteur d'une puissance nominale comprise entre 0,75 et 375 kW doit soit avoir un rendement supérieur ou égal au rendement IE3, soit atteindre le niveau de rendement IE2 et être équipé d'un variateur de vitesse. **Les moteurs haute efficacité (IE3, IE4) permettent de réduire la consommation électrique des machines-outils et de se conformer aux réglementations environnementales.**

Les nouvelles générations de moteurs génèrent moins de pertes, ce qui améliore leur rendement. Cependant, les coûts associés sont plus élevés. Le schéma suivant montre que les gains sont plus importants pour les moteurs de petite puissance : **15 points d'efficacité gagnés entre un moteur IE1 et IE5 de 1 kW, contre 5 points pour un moteur de 100 kW.** Le deuxième graphique met en évidence les gains annuels générés par le remplacement d'un moteur IE1 par un IE4 en fonction de plusieurs puissances et temps de fonctionnement (hypothèse de 160 €/MWh pour le calcul des gains). Les économies seront plus significatives pour les moteurs qui fonctionnent un plus grand nombre d'heures par an.



Investissement
Gain énergie
Facilité de mise en oeuvre



b. Variateurs : un variateur de vitesse, ou variateur de fréquence (VFD, pour Variable Frequency Drive en anglais), est un dispositif utilisé pour contrôler la vitesse d'un moteur électrique en ajustant la fréquence de l'alimentation électrique. **Il permet ainsi d'adapter la vitesse du moteur aux besoins réels d'une installation, ce qui entraîne des économies d'énergie, optimise les performances et prolonge la durée de vie des équipements.**



SCHNEIDER ELECTRIC

L'approche Schneider Electric pour la commande et la protection des moteurs - Contrôle de la chaîne mécatronique

La commande de moteur s'inscrit dans deux catégories : vitesse fixe et vitesse variable.

1. Vitesse fixe

Afin d'optimiser la gestion énergétique des moteurs à vitesse fixe, Schneider Electric a développé la gamme de démarreurs modulaires TeSys™ Island avec des fonctionnalités de données et de contrôle améliorées.

TeSys™ Island est une **solution numérique de la commande directe des moteurs apportant connectivité et fiabilité aux machines**. C'est un système de commande de charge entièrement numérisé et orienté objet afin de fournir des données conformes à l'Industry 4.0. Il réduit le temps de développement des machines, tout en permettant aux tableautiers de modéliser leur départ moteur DOL, il facilite la gestion de l'énergie pour les end users. En exploitation, TeSys™ Island offre aux utilisateurs **un accès facile et à distance aux données des moteurs et des charges pour une maintenance prédictive et préventive**, conduisant à des diagnostics et à une maintenance conditionnelle.

Grâce à son approche orientée objet, TeSys™ Island assure :

- Une surveillance de l'énergie pour chaque charge individuelle ainsi que pour tout l'îlot ;
- La sélection des applications et la configuration de la chaîne mécatronique ;
- La réduction et la facilité des tâches d'ingénierie ;
- Une installation plus rapide de la machine ;
- Une maintenance conditionnelle pour identifier les problèmes avant l'arrêt de la machine ;
- Un accès aux informations à distance avec une analyse proposée par le web server.

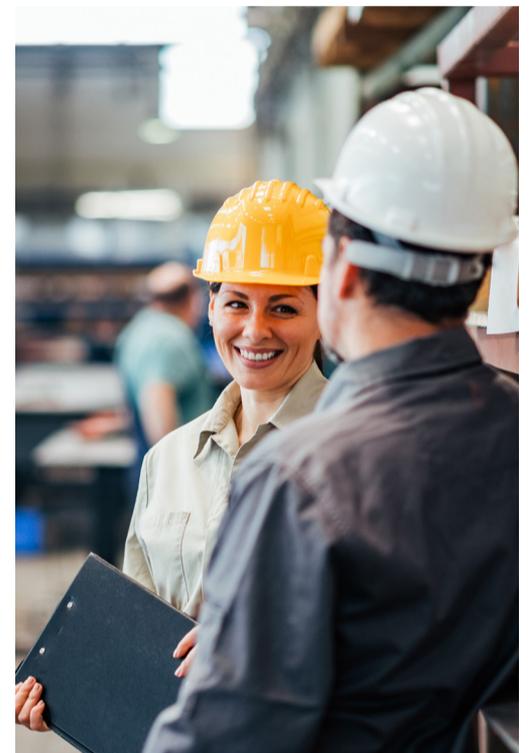
Comme le TeSys™ Island **possède de nombreuses fonctionnalités utiles en matière de qualité de l'énergie**, il peut également être utilisé dans des applications

non motorisées telles que les charges résistives (Éclairage, chauffage), etc., Il est important de sélectionner le bon contacteur pour les caractéristiques de la charge.

2. Vitesse variable - Altivar Process, la gamme de variateur de vitesse pour l'Industrie du Futur et la résilience énergétique.

Pour répondre à ces nouveaux défis, l'industrie a effectué une mutation vers une production plus sobre énergétiquement, plus rapide et ultra flexible. Cela n'est possible qu'en digitalisant les modèles mécaniques et en les déclinant à toutes les étapes de la production : de la conception à la formation, en passant par la fabrication et la maintenance. Les composants de cette usine digitalisée reposent sur des automatismes connectés et orientés services. La gamme de Variateurs de Vitesse Altivar, dédiée à la commande des pompes, intègre les quatre axes clés de cette stratégie : Connectivité, Mobilité, Cloud et Analyse.

Ces 4 valeurs sont les constituants de la stratégie EcoStruXure de Schneider Electric.



Avec l'utilisation d'un variateur de vitesse Altivar, les performances dynamiques sont nettement améliorées et les indications issues de Power Monitoring Expert ajustent le processus de façon optimale.

1 LA CONNECTIVITÉ

Ethernet (double port) est embarqué sur toute la gamme Altivar, assurant une intégration facile dans toutes les architectures.

2 LA MOBILITÉ

Un Web Server intégré pour se connecter à l'Altivar en tout lieu, à tout moment et sur tous les supports numériques et digitaux.

3 LE CLOUD

Outil de la dématérialisation, il délivre des informations contextuelles et personnalisées à tous les acteurs de la production à travers des QR codes dynamiques affichés sur le terminal graphique du variateur.

4 L'ANALYSE

Elle transmet les informations aux systèmes de gestion et de supervision grâce à son intégration simple et non propriétaire (DTM) dans toutes les architectures d'Automatismes. ATV Process, le variateur orienté Services

Exemple 1 : Implémentation d'un système moto-régulé au niveau du pompage d'eau brute

Le démarreur (WEG IE1 - 93%) d'une pompe a été remplacé par un variateur ATV630 (ABB IE4 - 96%) de 55 kW. Cette modification a permis de réaliser un gain de consommation de 109 MWh/an (soit une réduction de 30% de la consommation initiale ou de 10 tonnes de CO2 éq/an). L'investissement de 29 000 €, réduit de 60% (subventions), a été rentabilisé en moins de 3 ans (coût énergétique de 2021).

Lors des essais, la puissance consommée en pleine demande est deux fois moindre que sa puissance nominale. Le gain réel est deux fois supérieur au gain estimé pour valider le budget.

"Il ne s'agit pas de mon premier projet concernant l'installation des systèmes moto-régulés. Je peux vous confirmer qu'en cas de besoin de régulation (pompage, ventilation, broyage ou mélangeuse), le retour sur investissement est très intéressant en plus des aides en France"

Exemple 2 : Implémentation sur des compresseurs d'air

Les bénéfices économiques liés à l'installation de variateurs de vitesse n'ont pas été quantifiés ou suivis lors de la réalisation du projet. Cependant, la comparaison entre les données de suivi des compteurs et les données théoriques de consommation des compresseurs d'air a permis de mettre en évidence un gain de 10%. Des variateurs ont été implémentés sur deux équipements (de 30 kW chacun) des trois présents (142 kW).

Investissement
Gain énergie
Facilité de mise en oeuvre



c. Mettre en place des systèmes de récupération d'énergie : l'installation de systèmes de récupération d'énergie sur les moteurs industriels permet d'optimiser l'efficacité énergétique, notamment dans les applications de levage (grues, ponts roulants) et de centrifugation (industrie agroalimentaire).

Cette technologie repose sur l'utilisation de variateurs réversibles, qui convertissent l'énergie générée lors du freinage en électricité, permettant ainsi une économie d'énergie de 20 % à 30 %. Le concept s'inspire du SREC (Système de Récupération de l'Énergie Cinétique) utilisé en automobile et ferroviaire, où l'énergie de freinage peut être stockée sous différentes formes pour une réutilisation ultérieure (volant d'inertie, air comprimé, batterie, ou réseau électrique). Son intégration dans l'industrie contribue à réduire les coûts d'exploitation et l'empreinte environnementale des installations motorisées.

Investissement
Gain énergie
Facilité de mise en oeuvre



CETIM

3. Optimisation des transmissions :

Les problèmes de transmission ou de frottement dans les systèmes entraînés par les moteurs peuvent induire des pertes mécaniques - diminuant ainsi l'efficacité du moteur.

Lors du choix d'un équipement de transmission de puissance mécanique, il est essentiel de garder à l'esprit que **chaque élément de la chaîne cinématique possède son propre rôle, mais aussi son propre rendement**. Dans certains cas, il est nécessaire d'ajouter plusieurs systèmes de transmission pour obtenir l'effet mécanique recherché, par exemple : une transmission poulie-courroie + un réducteur + une transformation de la rotation en mouvement linéaire alternatif. Dans ce cas, chaque composant de la transmission de puissance a son propre rendement qui, cumulé à celui du moteur, va dégrader le bilan énergétique global de l'équipement.

En cas d'entraînement direct, le rendement sera celui du moteur avec éventuellement celui du variateur de vitesse. Sinon, il faudra tenir compte du rendement de la transmission : réduction ou augmentation de vitesse de rotation et conversion du mouvement. En cas de guidage de l'équipement mobile un rendement supplémentaire interviendra. Le choix de l'équipement de transmission de puissance est un **compromis entre l'équipement le plus économe donc ayant le meilleur rendement et la fonction mécanique à assurer**.

Les dispositifs ayant un rendement le plus élevé comme les vis à billes pour la conversion de mouvement ou les réducteurs épicycloïdaux ne répondent pas nécessairement à la fonction mécanique nécessaire à la machine étudiée. Ainsi, le choix du type de transmission dépend essentiellement du mouvement final requis par l'équipement motorisé.

Si l'équipement final est en translation, on utilisera les techniques suivantes : bielle-manivelle, pignon-crémaillère, vis à billes ou vis à rouleaux. Dans ce type de transmission, les pertes vont se focaliser au niveau des dentures des roues dentées et des

roulements des différents mouvements.

Si l'équipement final effectue un mouvement de rotation, on privilégiera les ensembles suivants : poulie-courroie, pignon-chaîne, pignon-engrenage, roue et vis sans fin. Parmi ces systèmes, le couple poulie-courroie est très répandu dans l'industrie. On distingue trois types de courroies :

LA COURROIE PLATE

Très facile à utiliser, mais présentant généralement un glissement sur la poulie, ce qui réduit le rendement de cet équipement.

LA COURROIE TRAPÉZOÏDALE

Offre moins de glissement et qui peut être utilisée pour transmettre plus de puissance, notamment avec des systèmes multi-courroies.

LA COURROIE CRANTÉE (SYNCHRONES)

Ne présente aucun glissement et possède un bon rendement pour la transmission de puissance. Elle peut transmettre une forte densité de puissance sans nécessiter de dispositif de lubrification.

Ces systèmes **ne nécessitent pas de lubrification**, mais ils sont sujets à l'allongement et demandent souvent un tendeur pour compenser ce phénomène.

Les pertes dans les engrenages et les transmissions complexes à pignons s'accumulent généralement sous forme de chaleur, entraînant une élévation de la température du lubrifiant. Dans certains cas, un système de refroidissement externe est nécessaire, ce qui réduit considérablement le rendement énergétique du dispositif.

Les couples pignon-chaîne ne présentent aucun glissement et permettent d'accepter de grands entraxes, mais ils **nécessitent une lubrification et présentent des bruits et des vibrations**. Il est possible, avec ce dispositif, de transmettre de forts couples, mais à basse vitesse.

Les engrenages permettent de **faire passer les plus grandes puissances et d'obtenir des rapports de réduction ou de multiplication**. Cependant, il faut être vigilant avec les grands rapports de transformation, qui génèrent



une forte diminution du rendement. **Dans les engrenages, on distingue deux grandes familles de pertes :**

1. Les pertes dépendantes de la charge appliquée à la transmission :

- Pertes par frottement au niveau des dentures des différents pignons composant la transmission.
- Pertes par frottement liées aux roulements associés à chaque pignon.

2. Les pertes indépendantes de la charge :

- Pertes par barbotage dans le lubrifiant : résistance du lubrifiant au mouvement des pignons, directement liée à sa viscosité.
- Pertes par cisaillement du lubrifiant sur les pignons : augmentation de la friction au niveau des dentures.
- Pertes hydrodynamiques dans les roulements, les paliers, les butées,...
- Pertes liées aux joints.

Bien que présentant des pertes, comme tous les systèmes présentés, **les transmissions par engrenages présentent d'excellents rendements, souvent proches de 99 %**, en particulier lorsqu'elles sont utilisées dans les conditions nominales de couple et de puissance.

Ces données peuvent être synthétisées à travers deux tableaux comparant les avantages et les inconvénients de chaque solution de transmission de puissance à la sortie d'un moteur électrique, ainsi que leurs rendements associés.

Il est essentiel de garder à l'esprit que, dans cette phase de transmission, l'efficacité énergétique doit être mise en perspective avec la fonction attendue du transfert de mouvement. Ainsi, les solutions les plus économes en énergie ne conviennent pas systématiquement à toutes les applications. **Une analyse détaillée de la cinématique est donc indispensable pour identifier le mode de transmission le plus adapté entre le moteur électrique et l'équipement à entraîner.**

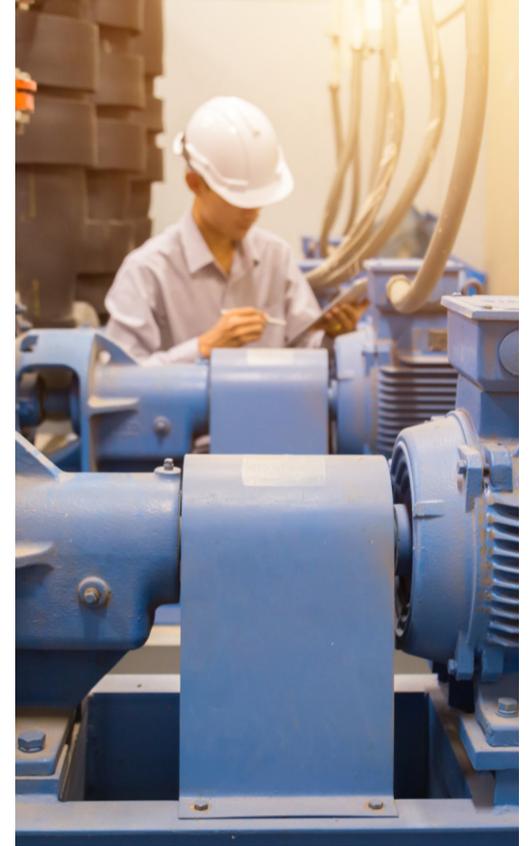


Tableau 1 : Comparaison des avantages et inconvénients de chaque famille de transmission mécanique.

TYPE DE TRANSMISSION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
TRANSMISSION PAR ENGRENAGES	<ul style="list-style-type: none"> - Haute efficacité énergétique - Grande précision - Longue durée de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Bruit - Nécessite une lubrification régulière - Encombrement
TRANSMISSION PAR COURROIE	<ul style="list-style-type: none"> - Coût modéré - Silencieuse - Facile à installer et à entretenir 	<ul style="list-style-type: none"> - Moins efficace que les engrenages, - Peut glisser (privilégier les courroies crantées) - Nécessite un ajustement de la tension
TRANSMISSION PAR CHAÎNE	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité de charge élevée - Durable - Peu coûteuse 	<ul style="list-style-type: none"> - Bruyante - Nécessite une lubrification et un entretien régulier - Peut s'étirer
TRANSMISSION DIRECTE	<ul style="list-style-type: none"> - Très efficace - Peu de pertes d'énergie - Maintenance réduite 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût initial plus élevé - Nécessite une conception spécifique de l'équipement

Tableau 2 : Rendements énergétiques classiquement évoqués en fonction des familles de transmission de puissance.

TRANSMISSION PAR ENGRENAGES.....	90% À 99%
TRANSMISSION PAR COURROIE.....	85% À 95%
TRANSMISSION PAR CHAÎNE.....	80% À 90%
TRANSMISSION DIRECTE.....	95% À 99%

Investissement	⚙️ ⚙️ ⚙️ ⚙️ ⚙️
Gain énergie	⚙️ ⚙️ ⚙️ ⚙️ ⚙️
Facilité de mise en oeuvre	⚙️ ⚙️ ⚙️ ⚙️ ⚙️

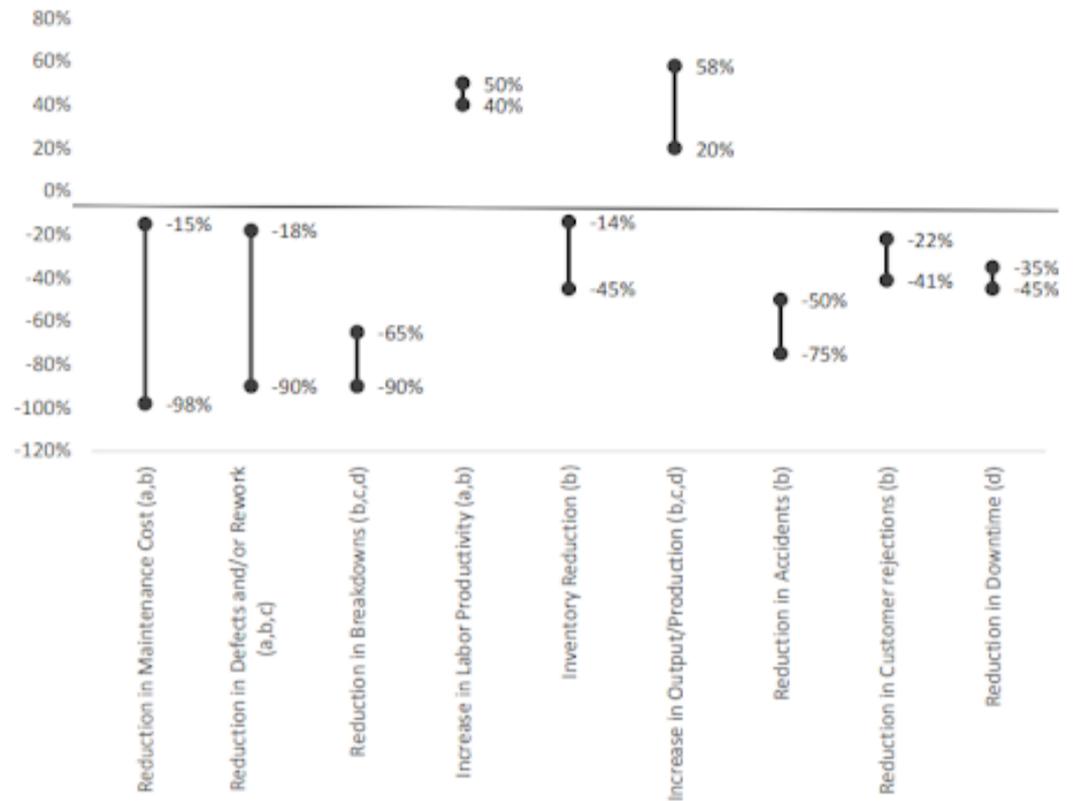
4. Maintenance et exploitation

a. Maintenance préventive : un entretien préventif régulier et complet, incluant la lubrification, le nettoyage des filtres et la vérification des alignements, permet de réduire les pertes liées aux défaillances mécaniques, de maintenir les performances (avec des gains énergétiques de 5 à 10 %) et de prolonger la durée de vie des moteurs.

Cependant, les conséquences énergétiques ne constituent pas toujours le principal argument en faveur de la mise en place d'une stratégie de maintenance. D'autres aspects, tels que la **sécurité, la disponibilité, la fiabilité, ainsi que la productivité et la qualité**, sont également mentionnés comme des objectifs possibles dans l'adoption de techniques de maintenance avancées.

Bien que l'investissement dans les techniques de maintenance avancées aboutisse souvent à un retour sur investissement élevé, il n'est pas systématiquement rentable et peut représenter un obstacle pour plusieurs industries. D'autres facteurs, tels que le **soutien technologique, les ressources humaines et l'état de préparation de l'organisation**, jouent également un rôle déterminant dans son adoption.

Figure 2.2: Range of Impacts Identified in Various Publications for Implementing Advanced Maintenance Techniques, Percent Change



Source : The costs and benefits of advanced maintenance in manufacturing - April 2018 - Douglas Stewart Thomas

Investissement     

Gain énergie     

Facilité de mise en oeuvre     



b. Suivi des consommations pour maintenance prédictive : le monitoring des moteurs associé avec un système de contrôle avancés en temps réel la performance, permettant **d'identifier rapidement les inefficacités ou anomalies dans leur fonctionnement et d'agir plus rapidement**. Une modernisation peut être nécessaire.



SCHNEIDER ELECTRIC

L'approche Schneider Electric pour la commande et protection des moteurs

Les solutions de l'efficacité énergétique passent par une analyse des points électro-intensifs et stratégiques du processus et de l'infrastructure concernés. Les éléments de la consommation électrique sont concentrés sur la commande des moteurs pour deux types d'applications :

- La commande des fluides pour les pompes et les ventilateurs ;
- La commande des mouvements à couple constant comme le transfert, la manutention, le positionnement, ...

Ces commandes sont présentes sur tous les segments métiers : WWW, MMM, O&, F&B, Infra, ... Il est donc indispensable de commander la chaîne mécatronique de façon optimale en s'assurant des points suivants :

- Commande sur la caractéristique optimale de la pompe ou du ventilateur (BEP) ;
- Surveillance des dérives mécaniques entraînant des surconsommations ;
- Maintien en condition opérationnelle de la chaîne de production afin d'assurer une maintenance conditionnelle et non plus curative.

Schneider répond à ces enjeux grâce à sa stratégie EcoStruxure, qui repose sur **l'analyse des datas et de commande/surveillance des actionneurs** pour une efficacité énergétique optimale des commandes de mouvements.

Mesurer

Calculer, modéliser, prévoir et suivre les principaux indicateurs de performance énergétique (IPE) avec des outils de visualisation et d'analyse de l'énergie.

Le plus important est de mesurer précisément les paramètres énergétiques des constituants critiques de l'installation, car **cette donnée constitue la base de la prise de décision et, en fin de compte, celle qui garantira l'optimisation, la fiabilité et le meilleur rendement des process**.

Schneider Electric a développé EcoStruxure Power Monitoring qui constitue le point

de départ pour quantifier les éléments d'amélioration avec un faible investissement commercial. Il interagit simplement avec l'environnement de production grâce à une installation non intrusive des solutions de détection sans fil et secondaires. Cette collecte **permettra d'établir des tendances et d'afficher des données avec une interprétation manuelle ou avec des outils d'analyse**.

Et pour quels services ?

Les problématiques et les tendances actuelles dans l'industrie 4.0 se concentrent sur la disponibilité de l'outil de production, tant en exploitation qu'en maintenance.

La tendance actuelle n'est plus de commander simplement un moteur avec un variateur, mais d'intégrer l'îlot applicatif dans son ensemble. Cela permet de ne plus travailler sur des grandeurs électriques, mais de modéliser l'application de l'exploitant en lui fournissant des informations en lien avec son métier. Par exemple, pour une pompe, il sera possible de visualiser ses caractéristiques et son point de fonctionnement par rapport au débit et à la hauteur de la colonne d'eau.

Cette fonctionnalité délivre un **suivi du process et des consommations, tout en analysant de la dérive du point de fonctionnement**. Ainsi, une maintenance préventive peut être réalisée, évitant tout arrêt de production non planifié. [Wilco Pumps Unlocks Sustainability with EcoStruxure Machine | Schneider Electric](#)

L'offre de services a considérablement évolué durant cette dernière décennie, elle est **passée d'actions curatives à une analyse conditionnelle**. Cette exigence est rendue nécessaire par l'amélioration de la disponibilité de l'outil industriel.

Avec l'émergence de l'Industrie 4.0, **la surveillance du process de fabrication est un élément clé pour préserver le CAPEX**, c'est-à-dire la disponibilité des organes équipements de commande et des moteurs.

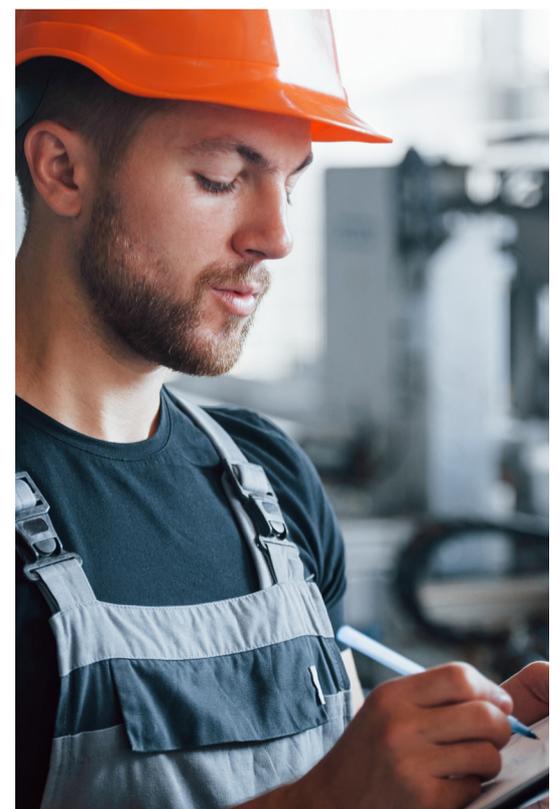
Que se passe-t-il lorsqu'un moteur électrique tombe en panne ?

L'un des premiers signes avant-coureurs d'une défaillance d'un moteur électrique est **l'augmentation des vibrations, souvent causée par un désalignement, un déséquilibre du rotor ou l'usure des roulements**. Sans détection ni correction à temps, ces vibrations peuvent accélérer la détérioration du moteur et peuvent conduire à une panne complète. Une surveillance régulière par analyse vibratoire permet d'identifier ces anomalies et d'intervenir avant qu'une défaillance majeure ne survienne.

En cas de panne avérée, deux solutions s'offrent aux industriels. **Pour les moteurs de moins de 10 kW, le remplacement est généralement privilégié en raison de son coût abordable et de la disponibilité des modèles standards**.

Pour les moteurs plus puissants, notamment au-delà de 30 kW, **le rebobinage est une option courante**, mais pas toujours faisable ni pertinente. Sa faisabilité dépend de plusieurs facteurs : l'état général du moteur, son usure, la qualité du circuit et les conditions d'exploitation.

Par ailleurs, même lorsqu'il est possible, **un rebobinage entraîne généralement une perte de rendement estimée entre 1 et 2 %**. Dans certains cas, un remplacement par un moteur neuf et plus performant peut être une alternative plus intéressante sur les plans énergétique et économique.



SCHNEIDER ELECTRIC

Dans l'industrie, la défaillance d'un moteur électrique peut avoir des **conséquences majeures sur la production**. Il faut avoir quelques chiffres en tête concernant les pannes sur une chaîne de production :

- **90 %**
du temps de maintenance est "en mode crise" (maintenance corrective).
- **5 %**
c'est le pourcentage du coût total de production dû aux pannes.
- **20 K€**
c'est le coût horaire moyen d'un arrêt de production dans l'agroalimentaire.
- **1 M€**
c'est le coût horaire d'un arrêt de production dans l'automobile.

La préoccupation de l'exploitant est donc la suivante : *"Je ne peux pas me permettre un arrêt de production inopiné. Il me faut un contrôle de la production avec un bilan énergétique, ainsi que des données de maintenance conditionnelle sur ma commande de moteurs BT/MT."*

La réponse de Schneider Electric, au travers d'EcoStruXure Asset Advisor for Drives & Moteurs, repose sur trois piliers :

1 Disposer d'un tableau de bord pour les variateurs et moteurs BT/MT.

2 Prévenir les pannes et intervenir efficacement.

3 Planifier les maintenances avec l'équipe d'intervention.

EcoStruXure Asset Advisor fournit donc un service clé pour la disponibilité de la commande des mouvements dans l'usine avec :

- Une **optimisation de l'efficacité énergétique de la commande des moteurs** grâce à une maintenance optimisée, assurant le fonctionnement

de la chaîne mécatronique à son meilleur rendement ;

- Une **visibilité de l'état de santé des Drives et des Moteurs** partout et à tout moment ;
- Une **anticipation des risques de panne** par un suivi à distance en temps réel ;
- Des **rapports mensuels** ainsi qu'un **rapport annuel complet** ;
- Un **accès 24 h/24 à l'expertise du constructeur** pour transformer les données brutes en plan d'action ;
- Une **réduction du risque de temps d'arrêt** grâce à la maintenance prédictive.

Avec EcoStruXure Asset Advisor for Drives & Motors, la commande des moteurs sur les procédés critiques est garantie, offrant à l'exploitant une visibilité complète sur l'état de santé du parc de variateurs. Passer d'une maintenance curative à une maintenance conditionnelle, c'est l'assurance pour nos clients de disposer d'un **outil de production compétitif et fiable, essentiel pour assurer la transition vers l'industrie du futur**.

Investissement

Gain énergie

Facilité de mise en oeuvre



Financement

Ces précédentes actions nécessitent des moyens humains, mais également financiers pour leur réalisation et implémentation. Cette dernière partie propose un état de l'art des principaux dispositifs d'aide et de financement liés aux actions d'efficacité énergétique, selon leur domaine d'application : études et formations ou investissements.

Pour chaque dispositif, un résumé du champ d'application, des critères d'éligibilité et du montant de l'aide allouée est fourni. Cependant, certains dispositifs étant limités dans le temps ou soumis à des périodes spécifiques de candidature et de disponibilité, certaines aides présentées ici pourraient ne plus être accessibles après la publication de ce document.

1. Financement des études et formations

Appels à projets : l'ADEME lance régulièrement des appels à projets spécifiques dans le domaine de l'efficacité énergétique électrique. Ces appels visent à soutenir financièrement des études, des expérimentations ou des projets pilotes contribuant à l'optimisation de la performance énergétique des moteurs électriques.

Le PACTE Industrie de l'ADEME : le PACTE Industrie propose un accompagnement personnalisé aux entreprises sélectionnées, les aidant à identifier des opportunités d'amélioration, à mettre en œuvre des solutions innovantes et à renforcer les compétences de leurs équipes en matière de transition énergétique. Ce soutien peut prendre plusieurs formes : conseils techniques, formations spécialisées, aides financières pour la réalisation de projets d'efficacité énergétique, ou encore des mises en relation avec des partenaires et des experts du domaine. PACTE Industrie finance entre 40 et 80 % des coûts pédagogiques des formations. Les études et coachings sont financés à hauteur de 50 à 70 % du coût de la prestation.

2. Financement des investissements

Fonds FEDER - Accroissement de la performance énergétique des entreprises industrielles : cette aide, sous forme de subvention, peut financer jusqu'à 80% de l'investissement pour les projets dépassant les 200 000€. Elle soutient des opérations visant à améliorer l'efficacité énergétique des entreprises, que ce soit pour des usages énergétiques au niveau des procédés industriels ou des équipements produisant des utilités. Ces investissements doivent permettre une réduction des émissions de gaz à effet de serre ou de la consommation énergétique du site.

Certificats d'Économies d'Énergie - CEE : Mise en place en France depuis 2006, les CEE



PACTE industrie

MANAGEMENT DE L'ÉNERGIE

FORMATION

- Structurer sa démarche énergétique

ACCOMPAGNEMENT

- Réaliser une étude d'opportunité d'évolution du mix énergétique
- Prime pour mettre en place la norme ISO 50 001 dans un site industriel

STRATÉGIE

Construire sa stratégie de décarbonation

FORMATION

- Piloter sa stratégie de décarbonation

ACCOMPAGNEMENT

- Élaborer sa stratégie de décarbonation
- Élaborer sa trajectoire d'investissement

Évaluer sa stratégie de décarbonation

FORMATION

- Piloter l'évaluation de sa stratégie de décarbonation

ACCOMPAGNEMENT

- Évaluer l'ambition de sa stratégie de décarbonation

FINANCEMENT

Disponible à partir du premier semestre 2024

FORMATION

- Financer ses projets

ACCOMPAGNEMENT

- Coaching pour projets d'investissement bas carbone

sont un dispositif de la politique énergétique visant à **encourager les économies d'énergie et la transition vers des sources d'énergie plus propres**. Ce dispositif impose aux fournisseurs d'énergie une obligation : promouvoir la réduction de la consommation d'énergie finale auprès de leurs clients en obtenant un quota déterminé de CEE.

Les actions sont répertoriées dans des fiches standardisées, détaillant les économies d'énergie générées en kilowattheures "cumulé" et "actualisé" (abrégié en kWh cumac) en fonction des travaux réalisés. Ce système permet de **quantifier les économies d'énergie de manière homogène et simplifiée, facilitant ainsi l'attribution des CEE**. Plus les économies sont importantes, plus le nombre de kWh cumac est élevé. Il n'existe pas de limite dans le nombre d'actions : une prime équivaut à une action.

Dans le cadre de cette étude sur l'efficacité énergétique des moteurs, les principales fiches ont été répertoriées à droite et classées par ordre croissant de couverture de l'action.

- IND-UT-134** - Système de mesurage d'indicateurs de performance énergétique
- IND-UT-136** - Système moto-régulé
- IND-UT-102** - Variateur électronique de vitesse sur moteur asynchrone
- IND-UT-127** - Système de transmission performant (rénovation seule)
- IND-UT-114** - Moto-variateur synchrone à aimants permanents ou à réluctance
- IND-UT-129** - Presse à injecter toute électrique ou hybride
- IND-UT-132** - Moteur asynchrone de classe IE4
- IND-UT-132** - Système électronique de pilotage d'un moteur électrique avec récupération d'énergie

Dispositif de la BPI n°1 - Le Prêt Vert - décarbonation des process et diversification du mix énergétique : le Prêt Vert vise à **soutenir les TPE, PME et ETI dans la réalisation de projets de transition écologique et énergétique**, en offrant un financement compris entre 50 000€ et 5 000 000€. Il encourage également la croissance des entreprises actives dans les secteurs de l'énergie et de l'environnement, ainsi que celles développant des innovations technologiques et des procédés contribuant aux objectifs climatiques et environnementaux de la taxonomie européenne. **Ce prêt favorise ainsi la transition vers des pratiques plus durables au sein des entreprises, telles que l'optimisation ou l'amélioration des procédés et des performances (énergie, eau, matière).**

Dispositif de la BPI n°2 - le Prêt Eco-Energie - Financer les équipements éligibles aux CEE : développé en partenariat avec le Ministère de la Transition Écologique, qui encadre le dispositif CEE avec l'ADEME, le Prêt Économies d'Énergie a pour objectif **d'encourager les TPE et PME à engager des programmes d'amélioration de leur efficacité énergétique, avec un financement allant jusqu'à 500 000€ sur une durée de 3 à 7 ans.** Le Prêt Économie d'Énergies finance l'acquisition équipements éligibles aux CEE dans les secteurs tertiaire et industriel, conformément aux Opérations Standardisées en vigueur. Le montant du prêt doit être inférieur ou égal au montant des fonds propres et quasi-fonds propres de l'emprunteur.

Dispositif de la BPI n°3 - Le Prêt Action Climat : le Prêt Action Climat est un prêt sans garantie destiné à **financer les projets de transition écologique et énergétique portés par des TPE et PME de moins de 50 salariés.** Il propose un financement de 10 000 € à 75 000 €, dans la limite d'un encours de financement en prêts digitaux de 75 000 € par bénéficiaire ou groupe bénéficiaire. La durée du prêt est modulable (3, 5 ou 7 ans) avec un différé d'amortissement en capital respectivement de 9 mois, 1 an et 2 ans.

La Banque des Territoires : l'offre d'investissement de la Banque des Territoires vise à **financer les projets d'efficacité énergétique en accompagnement des projets permettant de réduire les consommations énergétiques** (pour des équipements standards d'efficacité énergétique moins énergivores : groupes froids, compresseurs, moteurs à variateur de vitesse, pompes, etc.). D'autres projets liés à la décarbonation sont également finançables.

Conclusion - Logique de déploiement des actions d'efficacité énergétique

L'amélioration de l'efficacité énergétique repose sur une démarche structurée visant à optimiser la consommation d'énergie tout en maintenant ou améliorant les performances des processus industriels. Pour garantir des résultats durables, il est essentiel de suivre une approche méthodique, intégrant l'analyse des besoins, la hiérarchisation des actions et le suivi des performances. Cette section détaille la logique de déploiement des actions, en mettant en avant les principes clés : **identification des problématiques techniques, économiques et financières, ainsi que des enjeux de déploiement et de mesure continue de leur efficacité.**

1. Problématiques et choix techniques

- **Choix de la technologie :** quel type de variateur de vitesse ou de système de régulation est le plus adapté aux besoins de l'entreprise ?
- **Compatibilité avec les équipements existants :** les nouveaux systèmes de régulation peuvent-ils être intégrés sans modifications majeures ? L'emplacement précédent est-il compatible avec des moteurs de plus grande taille ?
- **Mise en service - Optimisation des performances :** comment garantir que la régulation ne réduit pas la performance du moteur et de l'ensemble du processus industriel ? Comment implémenter le processus de tests (différents modes, phases démarrage/arrêt, analyse vibratoire...)
- **Maintenance et fiabilité :** la régulation des moteurs entraînera-t-elle une usure plus rapide ou des besoins de maintenance accrus ?
- **Recueil des éléments / informations nécessaires :** quelles données faut-il apporter ? Quels impacts - travail à fournir : remise à jour des schémas électriques etc...

2. Problématiques économiques et financières - Éléments pour la validation du projet

- **Coût d'investissement initial :** les économies d'énergie réalisées justifient-elles l'investissement dans les variateurs de vitesse ou autres solutions ?
- **Retour sur investissement (ROI) :** en combien de temps l'entreprise pourra-t-elle rentabiliser ses investissements en efficacité énergétique ?
- **Accès aux financements et subventions :** Existe-t-il des aides publiques ou des incitations fiscales pour soutenir ces actions ?

3. Enjeux environnementaux, réglementaires et de déploiement

- **Respect des normes énergétiques :** l'installation de systèmes de régulation permet-elle de répondre aux exigences légales et aux normes internationales (ISO 50001, directives européennes, etc.) ?
- **Impact environnemental :** quelle est la réduction effective des émissions de CO₂ grâce à ces actions d'efficacité énergétique ?
- **Acceptation par les opérateurs et techniciens :** comment sensibiliser et former les employés à l'utilisation des nouveaux systèmes ? Quels sont les impacts sur les conditions de travail (nuisances sonores etc...) ?
- **Changement des habitudes de travail :** l'introduction de variateurs de vitesse ou d'autres régulations nécessite-t-elle une adaptation des méthodes de production ?

4. Comment suivre et mesurer l'efficacité et les performances des actions de régulation ?

- **Indicateurs de performance énergétique**
- **Outils de monitoring**
- **Maintenance préventive et corrective :** comment anticiper les pannes et optimiser la durée de vie des moteurs sous régulation ?

