
Considération d'un indicateur d'efficacité énergétique pour la prise de décision en maintenance

De sa définition au fondement de son pronostic

Hoang Anh, Phuc Do, Benoît Iung, Eric Levrat, Alexandre Voisin

CRAN, Université de Lorraine, UMR, CNRS 7039
Campus Sciences BP 70239 – 54506 Vandoeuvre Cedex
{Anh.hoang, van-phuc.do, benoit.iung, eric.levrat, alexandre.voisin}@univ-lorraine.fr

RÉSUMÉ. Ce papier a pour objet d'investiguer la problématique de considération de l'efficacité énergétique et de sa prévision comme nouvel indicateur dans la prise de décision en maintenance. En ce sens, le papier positionne tout d'abord les différentes définitions et concepts de l'efficacité énergétique en général, pour ensuite les particulariser au domaine industriel. Chaque concept est ainsi analysé et nous discutons de la pertinence de leur utilisation à différents niveaux de décision. Ceci nous permet de proposer une approche mult niveau d'évaluation d'un indicateur de l'efficacité énergétique d'un système industriel. L'évolution temporelle de cet indicateur en regard de la dégradation du système est ensuite abordée dans un objectif de maintenance prévisionnelle. Cela nous amène à proposer, en dual du concept connu de RUL (Remaining Useful Life), le concept de REEL représentant la durée de vie énergétique résiduelle. Des approches de pronostic de l'indicateur d'efficacité énergétique sont par conséquent investiguées pour permettre le calcul de cette REEL. Enfin, nous appliquons le concept d'efficacité énergétique proposé et montrons la valeur ajoutée de notre approche pour le pronostic de l'indicateur d'efficacité énergétique sur plusieurs niveaux de la plateforme laboratoire en télémaintenance TELMA.

ABSTRACT. The paper presents firstly an overview of various definitions/concepts of energy efficiency and their related applications in different contexts, especially in industrial sectors. Each definition/concept is analyzed and recommended for different decision-making levels. Then a multi-level approach is described in detail for evaluating energy efficiency indicator of an industrial process. The evolution of this indicator with regards to system degradation is studied leading to propose a novel concept named remaining energy-efficient lifetime (REEL). In addition, the paper discusses potential prognostic approaches in order to forecast energy efficiency indicator for calculating this REEL by underlining also difficulties and opportunities to implement such approaches. Finally, a case study on TELMA e-maintenance platform is introduced to illustrate energy efficiency concepts and the added value of the prognostics to predict energy efficiency evolution and REEL.

MOTS-CLÉS : efficacité énergétique, maintenance, pronostic, indicateurs décisionnels, système à composants multiples.

KEYWORDS: energy efficiency, maintenance, prognostic, decision indicators, multi-component system.

DOI:10.3166/JESA.49.559-578 © Lavoisier 2016

1. Introduction

Aujourd'hui, l'énergie est la question prépondérante pour la croissance économique (Jollands *et al.*, 2010 ; Lambert *et al.*, 2014 ; Steuwer, 2013 ; Trianni *et al.*, 2013 ; Urban and Scasny, 2012). En effet, comme les ressources énergétiques sont nécessairement limitées, l'énergie devient de plus en plus coûteuse. L'optimisation énergétique des installations fixes (procédés industriels continus, productions manufacturières, centres de calculs et/ou de stockages massifs...) et des systèmes mobiles (véhicules, transports, systèmes d'armes...) se doit donc d'être considérée comme un défi majeur en regard non seulement d'une compétitivité économique mais aussi d'un impact environnemental et d'une gestion des ressources en énergies (ex. eau, pétrole, *hydrogène*, biomasse) (Al-mofleh, 2009). Cette maîtrise est celle défendue par le développement durable et se construit prioritairement par une amélioration de l'efficacité énergétique (EE). L'efficacité énergétique est le rapport entre ce que produit l'installation ou le système, ce qu'il absorbe comme énergie et ce qu'il restitue comme énergie dissipée ou rejets. Elle est d'autant plus grande que l'installation, le système utilisent le moins d'énergie possible tout en étant proche de leur point de fonctionnement nominal – optimal. L'efficacité énergétique est donc à considérer aujourd'hui comme un indicateur clé du développement durable, de l'écologie industrielle (Bertoldi *et al.*, 2013 ; Boardman, 2004).

Face à ces enjeux en énergie, l'Europe a fixé des objectifs ambitieux pour promouvoir le développement de nouvelles technologies ou des technologies de rupture pouvant contribuer à améliorer cette efficacité énergétique et ainsi réduire la facture énergétique jusqu'à 20 % dans les secteurs industriels les plus énergivores (fabrication du verre, ciment, sidérurgie, raffinage...) (Dragomir *et al.*, 2009). Cette amélioration nécessaire *peut* se décliner sur différents axes complémentaires, dont :

- la conception d'équipements efficaces énergétiquement, propres, basés sur une combinaison énergétique,
- la mise en œuvre de dispositifs valorisant les rejets et/ou les énergies dissipés pour les exploiter de nouveau en tant que source d'énergie,
- le développement de systèmes d'aide à l'exploitation efficace, à la reconfiguration/adaptation et à la maîtrise des énergies dans une approche intégrée.

Ce dernier item peut, par exemple, faire appel à de nouvelles stratégies de conduite ou de maintenance. Dans le cas maintenance, l'efficacité énergétique peut donc être considérée comme un nouvel indicateur décisionnel qui viendrait compléter les indicateurs conventionnels représentatifs d'une stratégie basée soit sur

l'âge, soit sur la fiabilité de composant (Do *et al.*, 2013 ; Nicolai et Dekker, 1997). De plus, cette extension du périmètre de décision est favorable au passage d'une vision statique à une vision dynamique du choix des actions de maintenance, comme prônée par des maintenances conditionnelles/prévisionnelles. Ces maintenances, exploitant les technologies de l'information et de la communication, doivent permettre de suivre en ligne l'évolution de l'efficacité énergétique et ainsi de pronostiquer sa tendance future (Do *et al.*, 2015 ; Wang, 2002). Ceci nécessite cependant de faire évoluer les modèles conventionnels d'aide à la décision pour y considérer l'indicateur d'efficacité énergétique. C'est l'originalité majeure du travail présenté dans ce papier qui met principalement en évidence les différents concepts de l'efficacité énergétique et propose des méthodes permettant d'évaluer/prédire l'efficacité énergétique d'une machine ou d'un système industriel pour fournir, à l'aide à la décision, un nouvel indicateur clé. Pour ce faire, dans la section 2 sont détaillés les différents concepts/définitions de l'efficacité énergétique et de son application dans différents contextes, en particulier celui des systèmes industriels. Ceci permet en section 3, de proposer une formulation générique pour l'évaluation de l'indicateur d'efficacité énergétique pour des systèmes industriels. L'évolution temporelle de cet indicateur en regard de la dégradation du système est ensuite abordée dans un objectif de maintenance prévisionnelle permettant, en dual du concept connu de RUL (*Remaining Useful Life*), de définir le concept de REEL (*remaining energy-efficient lifetime*) représentant la durée de vie énergétique résiduelle. Ce concept est investigué à la fois au niveau d'un composant, d'une fonction ou d'un système. En section 4 sont discutées des approches de pronostic potentielles permettant de pronostiquer l'indicateur d'efficacité énergétique proposé pour calculer la REEL. Ceci permet en section 5, d'illustrer ce concept d'EE et la valeur ajoutée de notre approche de pronostic à la plateforme d'intégration en télémaintenance TELMA. Enfin une conclusion est donnée en section 6.

2. Concepts de l'efficacité énergétique

2.1. Concepts généraux

Depuis plusieurs années, et compte tenu de la gestion problématique de l'énergie en regard de critères économiques et environnementaux, de nombreux industriels ont souligné l'importance de la maîtrise de l'efficacité énergétique (EE) comme un outil efficace pour la prise de décision. Cette maîtrise repose majoritairement sur une évaluation quantitative de cette EE.

Cependant, il existe de nombreuses façons de quantifier l'efficacité énergétique principalement en fonction du niveau de décision qu'elle adresse, par exemple, une machine, une usine, ou un pays. En ce sens, le concept « d'indicateurs d'efficacité énergétique » (*energy efficiency indicators – EEI*), est souvent utilisé pour supporter cette évaluation/quantification. Ils doivent représenter la connexion entre la consommation d'énergie et la productivité (Salonitis et Ball, 2013). Ces indicateurs peuvent être classés en quatre catégories: indicateur thermodynamique, indicateur

physique-thermodynamique, indicateur économique-thermodynamique et indicateur économique.

2.1.1. Indicateur thermodynamique

Cet indicateur est défini comme le rapport entre les pertes énergétiques ou l'énergie consommée par le système, et l'énergie utile transformée en sortie. Ces deux derniers sont mesurés en unités thermodynamiques (ex., Joule). Ainsi, la définition thermodynamique de l'efficacité énergétique peut être exprimée comme le rapport entre l'énergie transformée en sortie et celle en entrée (Fysikopoulos *et al.*, 2012 ; Udphzrun, 2001). Par exemple, l'efficacité énergétique d'une chaudière à vapeur d'eau est calculée comme étant le rapport entre la quantité d'énergie transformée en sortie sous forme de vapeur et la chaleur d'entrée nécessaire pour faire bouillir l'eau. Dans le cas des moteurs électriques, elle correspond à l'énergie mécanique en sortie divisée par l'énergie électrique entrante. Cependant, il est important de noter que ces indicateurs d'efficacité énergétique ne peuvent pas être appliqués aux systèmes ayant des caractéristiques thermodynamiques inconnues. Ces indicateurs thermodynamiques ne sont donc pas adaptés pour la prise de décision à haut niveau (ex : pays, continent). Selon (Tanaka, 2008), l'efficacité énergétique thermodynamique est plutôt à utiliser au niveau composant. Ce niveau correspond à la technologie de conversion de l'énergie.

2.1.2. Indicateur physique –thermodynamique

Cet indicateur a été mis en place afin de pallier les limites des indicateurs thermodynamiques pour les systèmes pour lesquels le flux en sortie ne peut pas être transformé sous forme d'énergie équivalente, par exemple, les systèmes de transport. En fait, le produit en sortie est évalué en unités physiques tandis que l'entrée est représentative d'une énergie. De cette façon, l'efficacité énergétique est évaluée comme le ratio entre la productivité en sortie et l'énergie consommée (Ang, 2006 ; Giacone et Manco, 2012). Par définition, cet indicateur d'efficacité énergétique peut être appliqué à plusieurs niveaux de décisions : d'un niveau composant à un niveau stratégique local, par exemple un site de production.

2.1.3. Indicateur économique- thermodynamique

Pour cet indicateur, le flux sortant est transformé en valeur économique équivalente tandis que le flux entrant est exprimé en énergie. Il est donc calculé comme le rapport entre la valeur économique du flux sortant et l'énergie en entrée (Gavankar et Geyer, 2011 ; Tsvetanov et Segerson, 2013). Ce concept peut être vu comme une généralisation de deux concepts précédents. Il est souvent utilisé au niveau d'une gestion économique et/ou stratégique.

2.1.4. Indicateur économique

Pour cet indicateur, les flux sortant et entrant sont transformés en valeur économique équivalente. Il est donc défini comme le rapport entre la valeur économique du flux sortant et la valeur économique du flux entrant (Ang et Xu,

2013 ; Gvozdenac-Urosevic, 2010). Ainsi, ce concept est purement utilisé pour des gestions économique et comptable. Il convient pour la prise de décision à haut niveau (ex. national, international) où il est impossible de caractériser le flux sortant par une seule unité physique.

En résumé de ces quatre orientations, l'application potentielle de ces indicateurs de l'efficacité énergétique est illustrée dans la figure 1. Cette vision applicative nous permet de resituer le contexte présenté dans ce papier qui est centré sur l'efficacité énergétique pour des systèmes industriels correspondant plutôt au niveau système dans la figure 1.

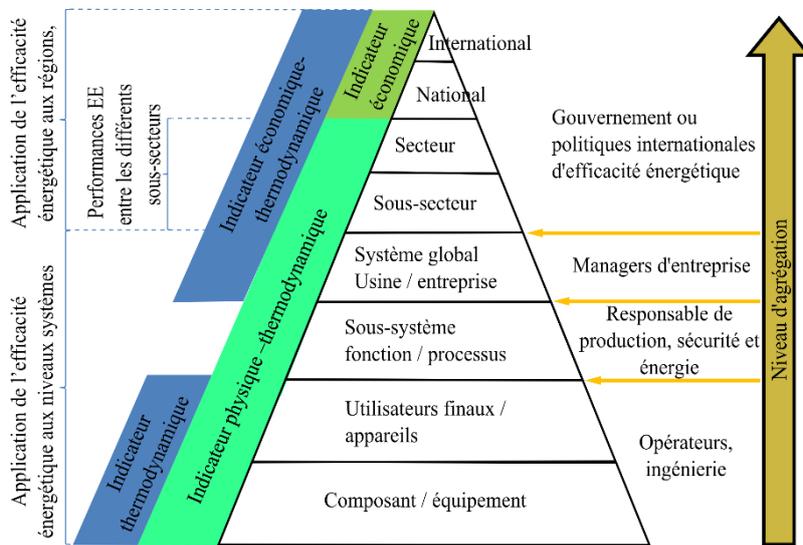


Figure 1. Applications potentielles des concepts d'efficacité énergétique

2.2. Concepts de l'indicateur d'efficacité énergétique pour le domaine industriel

Pour les secteurs industriels, la SEC (*Specific Energy Consumption*) est souvent utilisée comme l'indicateur d'efficacité énergétique le plus pertinent pour une maîtrise de l'énergie (Chan *et al.*, 2014 ; Saidur, 2010). La SEC est donc considérée comme l'indicateur clé dans notre problématique d'évolution des modèles d'aide à la décision en maintenance par intégration d'un suivi de l'EE. La SEC d'une machine est définie comme le rapport entre l'énergie consommée par la machine et le flux sortant (exprimé en unités physiques) délivré par la machine. En ce sens, cet indicateur est l'inverse de l'indicateur physique-thermodynamique. Pour une ligne de production (ex. somme de n machines), l'énergie consommée doit se calculer à partir de la somme de tous les types d'énergies (ex. électricité, gaz, charbon...). Par conséquent, mathématiquement, la SEC d'une ligne de production est définie par :

$$SEC = \frac{E_{in}}{O} \quad (1)$$

Où : E_{in} est la somme de toutes les énergies consommées, et O est la sortie de la ligne exprimée en nombre de produits physiques.

Lorsque la sortie physique n'est pas dénombrable (par exemple dans le cas de transformateurs électriques, générateurs électriques), la SEC est ramenée à un indicateur thermodynamique qui est exprimé par :

$$SEC = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (2)$$

Où : E_{out} est l'énergie utile en sortie. $E_{out} = E_{in} - E_{co}$ avec E_{co} étant l'énergie consommée. L'indicateur SEC dans ce cas correspond à l'inverse du rendement énergétique. Son évolution dépend, d'une part, de la sollicitation du système, i.e. l'objectif qui est assigné au système et à sa conduite, mais également d'autres facteurs comme par exemple son âge, son environnement, sa maintenance, etc. Ces facteurs sont discutés dans la suite de ce papier.

3. Formulation et évaluation de la performance d'efficacité énergétique

3.1. Évaluation des indicateurs d'efficacité énergétique

Nous nous intéressons ici à l'évaluation de l'indicateur d'efficacité énergétique (SEC) à la fois au niveau composant et au niveau système puisque cet indicateur peut être exploité par différentes parties prenantes du système n'intervenant pas nécessairement tous sur le même niveau de décision (ex. opérationnel, tactique, stratégique).

3.3.1. Évaluation au niveau composant

Pour pouvoir évaluer l'efficacité énergétique d'une machine (ex. un système manufacturier), il est important dans un premier temps d'identifier les facteurs/indicateurs impactant l'énergie consommée et la productivité de la machine, en sachant que la machine est globalement à assimiler à un ensemble de composants caractérisables aussi par leur énergie et « un type de produits » délivrés (principe de généralité). Soient E_i^t et O_i^t l'énergie consommée et la performance en sortie du composant i à l'instant t . Ce dernier correspond à la qualité/quantité de traitement, la vitesse, l'énergie, etc. On a donc :

$$E_i^t = f_i^t(PI_i^E, NPI_i^E) \quad (3)$$

$$O_i^t = g_i^t(PI_i^O, NPI_i^O) \quad (4)$$

$$SEC_i^t = \frac{f_i^t(PI_i^E, NPI_i^E)}{g_i^t(PI_i^O, NPI_i^O)} \quad (5)$$

Où :

– PI_i^E : l'ensemble des facteurs physiques impactant la consommation d'énergie du composant i tels que le rendement de transformation de l'énergie, les conditions environnementales dans lesquelles le composant évolue, le niveau de détérioration du composant, la qualité des matières premières ;

– NPI_i^E : l'ensemble des facteurs non physiques influant sur la consommation d'énergie du composant i tels que l'âge, la planification de production, les compétences des intervenants de pilotage ;

– PI_i^O : l'ensemble des facteurs physiques affectant la performance en sortie du composant i tels que la disponibilité des fournisseurs, les déchets, les types de produits;

– NPI_i^O : l'ensemble des facteurs non physiques affectant la performance du composant i .

Dans un second temps, il convient d'identifier la relation entre les indicateurs, la consommation d'énergie et la production. Cette relation est modélisée par les fonctions de l'équation (5). La forme de ces deux fonctions dépend des caractéristiques de la machine i .

3.3.2. Évaluation au niveau fonction/système

Considérons un système à n composants qui sont interconnectés selon une configuration donnée. L'efficacité énergétique de ce système est définie comme suit:

$$\mathbf{SEC}_{\Sigma}^t = \frac{E_{\Sigma}^t}{O_{\Sigma}^t} \quad (6)$$

Où E_{Σ}^t et O_{Σ}^t sont respectivement l'énergie totale consommée et la performance globale du système. Il est important de noter que la performance au niveau système peut être différente de celle liée au niveau composant. Par exemple, la performance en sortie d'une ligne de production peut être le nombre de produits par une unité de temps, le taux de bons produits tandis que, au niveau composant, la performance en sortie de moteurs de la ligne est le nombre de rotations par minute. Suivant l'architecture d'un système à composants multiples, la sortie d'un composant peut devenir l'entrée d'autres composants (ex. série). Ainsi E_{Σ}^t et O_{Σ}^t sont calculés par :

$$E_{\Sigma}^t = \sum \omega_i^t \cdot E_i^t \quad (7)$$

$$O_{\Sigma}^t = \sum \lambda_i^t \cdot O_i^t \quad (8)$$

Où :

– λ_i^t est le facteur de pondération associé à la sortie du composant. $\lambda_i^t = 0$ si le composant i ne fournit pas de produits finaux ;

– ω_i^t est le facteur de pondération de l'énergie associé au composant i . ω_i^t est directement lié à l'énergie consommée par le composant quand il est intégré dans le

système (considération du composant dans la fonction qu'il remplit avec d'autres composants, et non plus uniquement dans une vision isolée).

En utilisant les équations (7) et (8), il est possible de calculer l'efficacité énergétique au niveau système :

$$\mathbf{SEC}_{\Sigma}^t = \frac{E_{\Sigma}^t}{O_{\Sigma}^t} = \frac{\sum \omega_i \cdot E_i^t}{\sum \lambda_i^t \cdot O_i^t} \quad (9)$$

L'illustration de cette approche est présentée dans la figure 2.

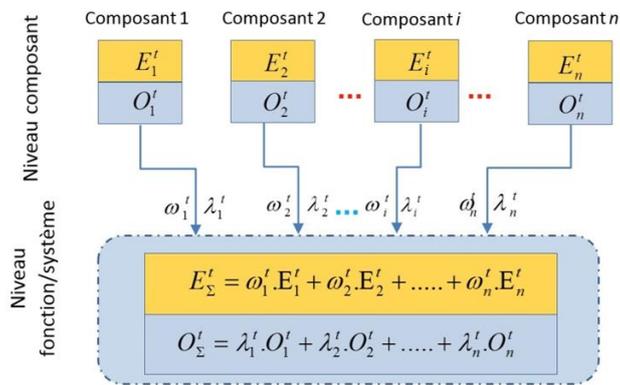


Figure 2. Approche d'agrégation pour calculer l'efficacité énergétique au niveau fonction/système

Cette vision multiniveau de l'EE est primordiale dans une logique d'identification des composants « critiques » en EE mais aussi de fonctions critiques voire de sites critiques. En effet la prise de décision peut donc s'orienter sur une logique plus technique, plus fonctionnelle, ou plus économique de l'EE. Cette logique est aussi à moduler non seulement en regard de l'EE à un instant bien précis mais aussi de son évolution, sa prédiction en regard du profil d'emploi envisagé pour le composant, le système (ex. Est-ce que la maîtrise de l'EE est assurée aussi dans le futur ?). Dans cette voie, le pronostic de l'EE prend tout son sens surtout dans une considération de maintenance prévisionnelle permettant d'anticiper des défaillances ou des non performances du système en considérant son évolution temporelle et donc sa dégradation.

3.2. Durée de vie énergétique résiduelle

Afin d'évaluer la performance d'efficacité énergétique d'une entité (une machine, une fonction, ou un système) au sens de sa prévision, nous proposons, en dual du concept connu de RUL (*Remaining Useful Life*), la notion de durée de vie énergétique résiduelle (*Remaining Energy-Efficient Lifetime*, REEL), définie comme

le temps restant avant que cette entité perde sa caractéristique attendue d'efficacité énergétique (seuil d'efficacité énergétique) étant donné l'état actuel de l'entité, les conditions de fonctionnement aux instants passé et futur, les conditions d'usage etc. Mathématiquement, la REEL peut être exprimée comme suit :

$$REEL(t) = \{E[T]; SEC^{t+T} = SEC_{Threshold} | SEC^t < SEC_{Threshold}\} \quad (10)$$

Où : T est une variable aléatoire; $E[T]$ indique l'espérance mathématique de T et $SEC_{Threshold}$ est un seuil associé à une propriété d'efficacité énergétique de l'entité. La valeur $SEC_{Threshold}$ est déterminée soit par des exigences de durabilité soit par une phase d'optimisation. La figure 3 illustre le concept de REEL et son application en maintenance. La REEL est utilisée comme un indicateur décisionnel pour la maintenance préventive. Si la REEL estimée à l'instant actuel t est inférieure à un seuil préfixé, une opération de maintenance préventive se doit d'être effectuée.

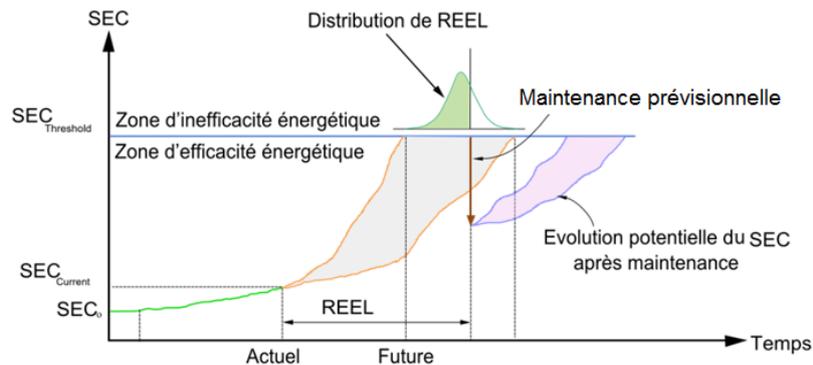


Figure 3. Illustration du concept de REEL et son application pour l'aide à la décision en maintenance

Cette considération de durée de vie énergétique résiduelle, nous amène très logiquement à investiguer les approches de pronostic pour calculer la REEL aux niveaux composant et fonction/système.

4. Approche de pronostic de l'efficacité énergétique

4.1. Approches de pronostic : une vision générale

Au sens général, le concept de pronostic a été introduit et appliqué avec succès pour des applications différentes (Muller *et al.*, 2008 ; Si *et al.*, 2011) principalement dans un objectif d'anticiper des défaillances de composants. En effet, le but du pronostic est de prédire le temps restant avant une défaillance en tenant compte de l'état actuel d'une machine ou d'un système, des conditions de

fonctionnement passées et futures. Le temps restant avant une défaillance d'une machine ou d'un système est généralement appelé la durée de vie résiduelle (ou RUL). Pour la prédiction de ce dernier, plusieurs approches de pronostic ont été proposées et classées en trois typologies de méthodes différentes (Si *et al.*, 2011) :

– Pronostic basé sur l'expérience : ce type d'approche est fondé sur l'exploitation de la connaissance sur la défaillance ou la dégradation du système pour la prédiction de RUL (Muller *et al.*, 2008; Reviewed and Riverside, 2013). Ce type d'approche est assez simple à mettre en œuvre mais non applicable dans un contexte dynamique où le système et/ou son environnement évoluent dynamiquement au fil du temps;

– Pronostic guidé par les données : ces approches sont basées sur un ensemble de données temporelles d'un système traduisant l'évolution d'indicateurs de l'état de santé du système (Goebel *et al.*, 2008; Sankararaman and Goebel, 2014; Si *et al.*, 2011). Cela permet une précision plus élevée que par le premier type d'approches (Pronostic basé sur l'expérience) mais requiert un système de surveillance, du temps d'apprentissage;

– Pronostic basé sur les modèles : ce type d'approches est basé sur la compréhension des principes et des mécanismes physiques de dégradation se produisant sur un système. Cette connaissance permet de construire des modèles de comportement du système intégrant l'évolution dynamique de la dégradation (Fan *et al.*, 2014 ; Medjaher *et al.*, 2014). Pour ces approches, la précision de prédiction dépend de la précision des modèles construits.

4.2. Approche générique de pronostic pour la prédiction de la performance d'efficacité énergétique

Dans la considération EE pour aider à la prise de décision en maintenance prévisionnelle, l'objectif est donc de prédire la performance d'efficacité énergétique (EEI ; SEC) à différents niveaux d'abstraction du système et par conséquent de calculer la REEL pour chacun de ces niveaux. En ce sens, nous proposons une approche générique se basant sur une combinaison d'approches de pronostic présentées dans la section précédente pour prédire l'EEI et donc calculer la REEL au niveau composant et aussi au niveau fonction/système.

4.2.1. Prédiction d'EEI et REEL au niveau composant

Pour pouvoir évaluer la REEL d'un composant, la consommation d'énergie ainsi que le niveau de productivité (à travers le flux sortant) dans des conditions/modes de fonctionnements donnés, doivent être estimés. Cependant, ils dépendent de plusieurs facteurs/indicateurs (ex. facteurs physiques et non physiques ; revoir les équations (3) et (4)). Cela signifie que ces facteurs/indicateurs doivent être tout d'abord identifiés et évalués. Des modèles ou des techniques d'agrégation peuvent être ensuite déployés pour l'évaluation de la consommation d'énergie et le niveau de productivité à partir des indicateurs physiques et non physiques déterminés.

Il est important de noter qu'en général, les facteurs non physiques sont généralement connus à l'avance et les indicateurs physiques, qui peuvent dépendre des caractéristiques du composant, des conditions associées et des facteurs non physiques, sont souvent inconnus. L'évolution de ces facteurs physiques peut être prédite par des approches de pronostic mentionnées dans la section précédente. L'approche générique proposée est illustrée par la figure 4.

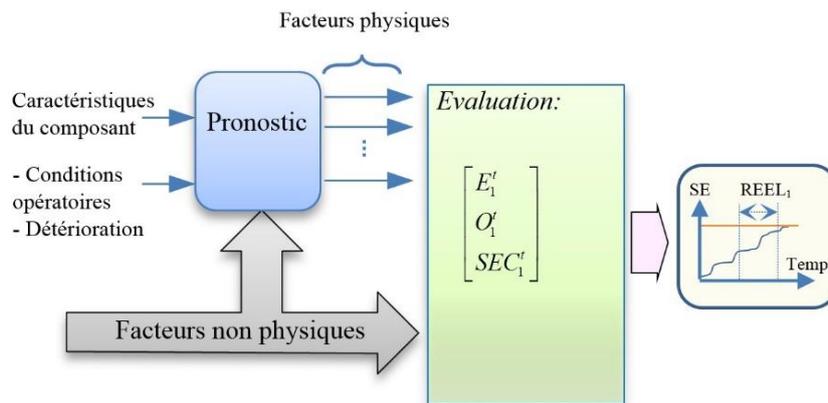


Figure 4. Processus de prédiction de la REEL au niveau des composants

4.2.1. Prédiction d'EEI et de la REEL au niveau fonction/système

Comme présenté dans la section 3.3, pour évaluer la REEL associée à une fonction ou un système, nous avons besoin non seulement des informations liées à tous les composants (consommation d'énergie, flux sortant, REEL) mais aussi des informations relatives à la fonction ou au système tels que la structure du système, les dépendances entre composants, le planning de production, des éléments sur le système de soutien, etc. En effet, les informations relatives aux composants sont calculées par l'approche proposée dans la section précédente. Les informations relatives à la fonction ou au système permettront d'évaluer les facteurs de pondération associés à la consommation globale d'énergie et ceux liés à la productivité. Il est nécessaire de noter que ces facteurs peuvent changer au fil du temps. La figure 5 illustre le processus de prédiction de la REEL au niveau d'une fonction ou d'un système à partir du processus proposé en figure 4.

Tous les résultats précédents de calcul de la REEL et de tendances de l'indicateur d'efficacité énergétique sont donc directement exploitables comme entrée du processus d'aide à la prise de décision en maintenance (majoritairement conditionnelle et prévisionnelle) en venant se combiner avec les indicateurs classiques de disponibilité, de sécurité etc. Cette considération décisionnelle fait l'objet de nos travaux actuels.

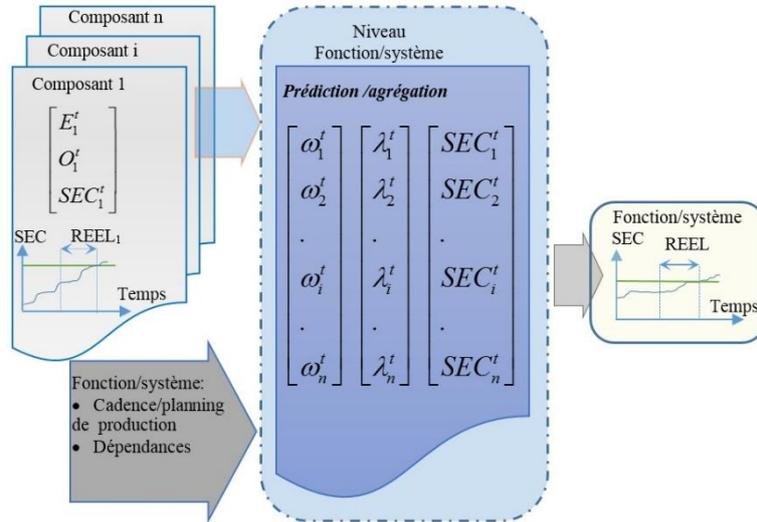


Figure 5. Processus de prédiction d'EEI et calcul de la REEL au niveau fonction/système

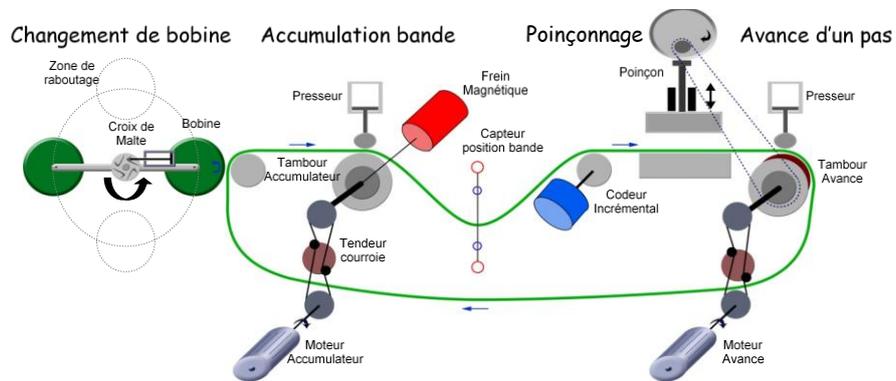


Figure 6. Différents postes de la plateforme TELMA

5. Validation des concepts EEI (SEC) et REEL au cas d'application de la plateforme TELMA

Pour illustrer et montrer la faisabilité et l'intérêt des concepts d'efficacité énergétique proposés et des approches d'évaluation/prédiction associées, nous avons décidé de les appliquer au cas de la plateforme d'intégration en télémaintenance TELMA (TÉLÉMaintenance) située au sein de l'AIPL (Atelier Inter-établissement

de Productique Lorrain). La plateforme TELMA permet de simuler le déroulement et la découpe d'une bande représentant plus globalement un produit de type feuilles métalliques pouvant être en entrée ensuite de machines de types presse. C'est donc à échelle réduite, une analogie avec un système réel utilisé chez PSA Mulhouse pour l'emboutissage de tôles. TELMA est composée de 4 sous-systèmes : changement de bobine, accumulation de bande, poinçonnage et avance de bande (figure 6) (Iung *et al.*, 2009).

La plateforme peut accomplir différentes fonctions en lien avec les sous-systèmes, cependant dans cette étude seulement la fonction de poinçonnage est considérée. Cette fonction est supportée par le moteur d'avance (M1) et le moteur d'accumulation (M2). M1 et M2 sont considérés comme deux composants principaux pour la consommation d'énergie électrique. Cela signifie que l'énergie consommée totale de la fonction ciblée de poinçonnage est calculée par :

$$E_{\Sigma}^t = E_{M1}^t + E_{M2}^t \quad (11)$$

Cette relation est également obtenue à partir de l'équation (7) en remplaçant $\omega_{M1}^t = \omega_{M2}^t = 1$.

Notons que ces deux moteurs sont physiquement identiques et ils fonctionnent de manière indépendante : le premier maintient la performance en sortie (productivité ; nombre de bandes découpées/poinçonnées) tandis que le second maintient le stress de la bande (appelé aussi poumon). La performance en sortie de la fonction de poinçonnage est donc le nombre de produits par minute tandis qu'au niveau composant, la performance en sortie des moteurs M1 et M2 est le nombre de rotations par minute. Ces mesures de performance peuvent être modifiées, surveillées et enregistrées.

L'énergie consommée de chaque moteur est surveillée et enregistrée par un wattmètre. L'effet de la détérioration du roulement mécanique (considération de la dégradation) est simulé mécaniquement par une force appliquée sur la rotation par un frein électromagnétique, qui est directement attaché au rouleau. Il est important de noter que la consommation électrique de chaque moteur dépend principalement de la vitesse de rotation (liée à la productivité demandée en sortie) et du niveau de dégradation du roulement (à faire évoluer en modifiant via l'automate la consigne de freinage électromagnétique). Afin d'approximer cette relation de dépendance, il a été effectué dans un premier temps, tout un ensemble d'expérimentations sur TELMA en faisant varier les différents paramètres. Ensuite, dans un second temps, les données ainsi récoltées ont été traitées en utilisant la technique d'analyse de régression non linéaire.

5.1. Apprentissage de données pour l'évaluation de la consommation énergétique

Étant donné que les deux moteurs (M1 et M2) sont identiques, notre expérimentation a été effectuée sur un seul moteur, le M1, de TELMA. La consommation électrique du moteur est mesurée et enregistrée en faisant varier la vitesse de rotation du moteur et le niveau de dégradation du roulement (via le

freinage). En effet, la vitesse de sortie du moteur, notée $S1(t)$, varie de 300 à 1800 tr/min. Le niveau de dégradation du roulement, notée $D(t)$, varie de 0% à 100% (le moteur est considéré comme défaillant quand le niveau de dégradation du roulement $D(t)$ est à 100 %). La figure 7 représente la consommation réelle du moteur qui est fonction de la vitesse de rotation en sortie et le niveau de détérioration (force de freinage électromagnétique). Cette figure montre que la vitesse et le niveau de dégradation ont une influence importante sur la consommation d'énergie du moteur.

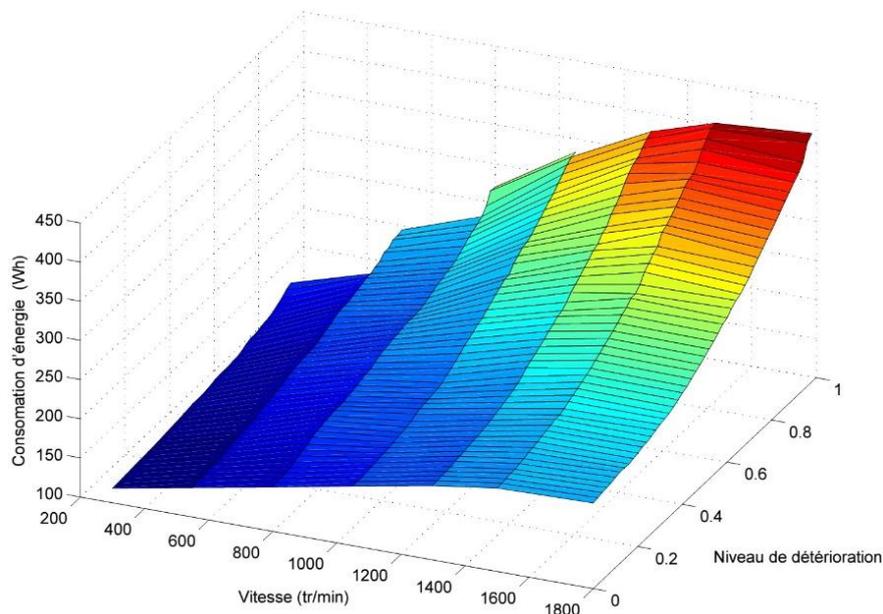


Figure 7. Consommation d'énergie réelle du moteur d'avance (M1) en fonction de sa vitesse et de son niveau de détérioration

Pour trouver le modèle de consommation d'énergie du moteur M1, l'analyse de régression non linéaire (Ritz et Streibig, 2008) a été appliquée. Un modèle de régression polynomiale a ainsi été utilisé. De cette manière, la consommation d'énergie de M1 est calculée approximativement par:

$$E_{M1}^t = 7856.79/S1(t) + 44.917 + 19.538 * D1(t) + 0.168 * S1(t) - 1.187E - 05 * S1(t)^2 * D1(t) - 4.3579E - 05 * S1(t)^2 + 0.0011 * S1(t) * D1(t) + 0.104 * S1(t) * D1(t)^2 + 1.8007E - 05 * S1(t)^2 * D1(t)^2 \quad (12)$$

Avec $S1(t)$ et $D1(t)$ représentant respectivement la vitesse de rotation et le niveau de détérioration du moteur M1 à l'instant t . Le coefficient de détermination (R2) est égal à 0.988. Selon les résultats obtenus, la consommation d'énergie calculée est présentée par la figure 8.

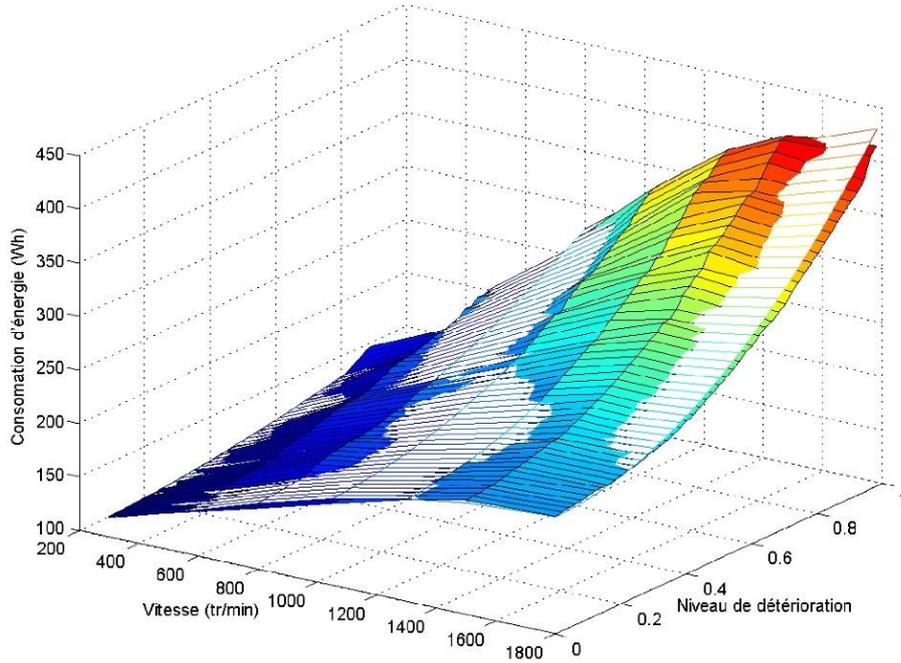


Figure 8. Consommation calculée approximativement du moteur M1 en fonction de sa vitesse et de son niveau de détérioration

Le modèle représenté par l'équation (12) est désormais utilisé pour l'évaluation de l'indicateur d'efficacité énergétique (SEC) aux niveaux composant et fonction.

5.2. Évaluation de SEC aux niveaux composant et fonction

En se basant sur le résultat présenté par l'équation (12), l'indicateur d'efficacité énergétique des moteurs M1 et M2 peut être calculé par :

$$SEC_{M1}^t = \frac{E_{M1}^t}{O_{M1}^t} = \frac{E_{M1}^t}{S1(t)*60} \quad \text{et} \quad SEC_{M2}^t = \frac{E_{M2}^t}{O_{M2}^t} = \frac{E_{M2}^t}{S2(t)*60} \quad (13)$$

Avec $S2(t)$ étant la vitesse de rotation du moteur M2. La consommation énergétique du moteur M2 a été calculée de façon similaire à celle du moteur M1 (identité des moteurs M1 et M2) à partir de l'équation (11) :

$$E_{M2}^t = 7856.79/S2(t) + 44.917 + 19.538 * D2(t) + 0.168 * S2(t) - 1.187E - 05 * S2(t)^2 * D2(t) - 4.3579E - 05 * S2(t)^2 + 0.0011 * S2(t) * D2(t) + 0.104 * S2(t) * D2(t)^2 + 1.8007E - 05 * S2(t)^2 * D2(t)^2 \quad (14)$$

À partir des résultats de niveau moteur, il est donc possible de s'intéresser maintenant à la performance en sortie de la fonction de poinçonnage. Celle-ci est la cadence de production qui est liée directement à la vitesse du moteur M1 car la fonction du moteur M2 est de maintenir le stress de la bande. Pour pouvoir fabriquer un produit, le moteur doit tourner à 25 tours. Cela signifie que la performance en sortie de la fonction de poinçonnage est calculée par :

$$O_{\Sigma}^t = \frac{O_{M1}^t}{25} \quad (15)$$

Cette relation est également obtenue à partir de l'équation (8) en remplaçant $\lambda_{M1}^t = 1/25$ et $\lambda_{M2}^t = 0$.

À partir des équations (11) et (15), l'indicateur d'efficacité énergétique de la fonction de poinçonnage peut être évalué par :

$$SEC_{\Sigma}^t = \frac{E_{M1}^t + E_{M2}^t}{\frac{O_{M1}^t}{25}} \quad (16)$$

Les modèles représentés par les équations (11)-(16) peuvent être utilisés afin de pronostiquer la performance d'efficacité énergétique (l'évolution de l'indicateur d'efficacité énergétique – SEC amenant à calculer la durée de vie énergétique résiduelle-REEL) aux niveaux composant et fonction pour une mission donnée avec des conditions opératoires spécifiques.

5.3. Pronostic de la performance d'efficacité énergétique et calcul de REEL

Afin de pouvoir prédire l'évolution de l'indicateur d'efficacité énergétique (SEC) et calculer des REEL, l'information concernant la cadence de production en sortie ainsi que des conditions opératoires associées doivent être précisées. Ce dernier item est, dans cette étude, relatif au comportement de détérioration des deux moteurs M1 et M2. Il est supposé que ce comportement de détérioration ne dépend que du temps. Il est montré dans de nombreux travaux de recherche que le comportement de détérioration d'un moteur peut être modélisé par un processus stochastique (Do *et al.*, 2012 ; Van Noortwijk, 2009). En ce sens, des processus stochastiques Gamma sont utilisés dans cette étude afin de simuler le comportement de détérioration des moteurs M1 et M2. On suppose que le moteur M1 (ou M2) est considéré comme défaillant quand son niveau de détérioration atteint un seuil de 100 %. Les paramètres associés au modèle de détérioration Gamma sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Données sur le modèle de détérioration des deux moteurs

	α	β
Moteur 1	2	2
Moteur 2	1	1

L'évolution de détérioration des deux moteurs est simulée et illustrée en figure 9b. Considérons maintenant un profil de mission dont le changement de cadence de production est représenté en figure 9a. En se basant sur l'évolution de détérioration simulée et la cadence de production, l'indicateur d'efficacité énergétique (SEC) de la fonction est évalué et représentée par la figure 9c en appliquant les équations (11), (15) et (16).

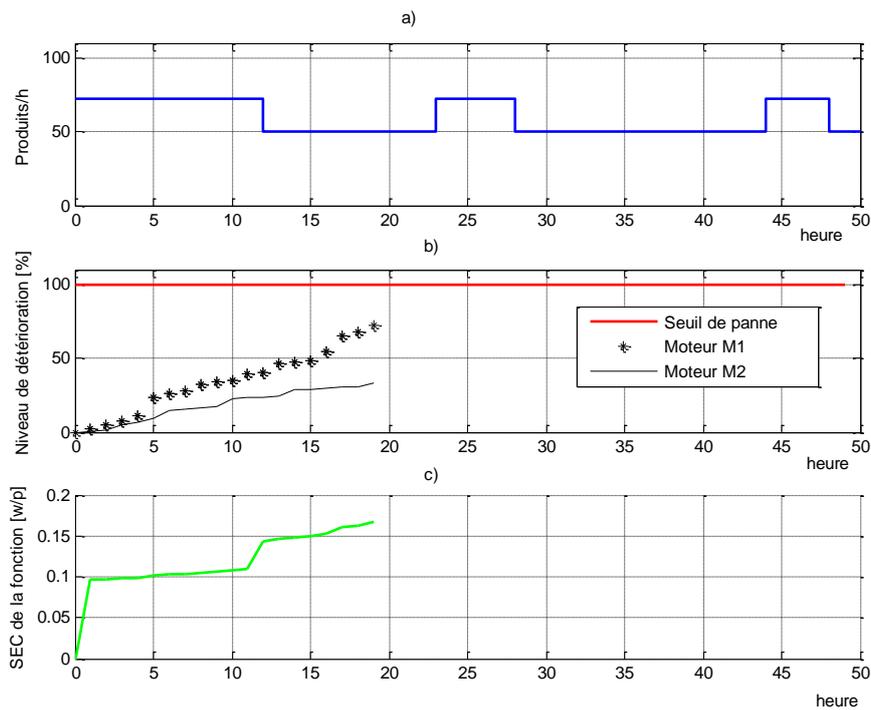


Figure 9. Profil de mission (a) – évolution de la détérioration des deux moteurs (b) - évolution SEC/EEI au niveau fonction (c)

La plateforme TELMA perdra sa propriété d'efficacité énergétique quand son indicateur SEC atteint une limite $SEC_{Threshold} = 0.15$ (w/produit ; seuil estimé). Ce seuil peut être lié à la phase d'optimisation globale de maintenance/pilotage de production ou à des contraintes de développement durable. En ce sens, il est intéressant de savoir dans combien de temps la plateforme va perdre sa propriété d'efficacité énergétique. Cette question nous amène à calculer la REEL. La figure 10 présente la distribution de REEL quand sont simulées les évolutions potentielles de détérioration des deux moteurs M1 et M2. Selon ce résultat, la REEL calculée est de 17.45 heures.

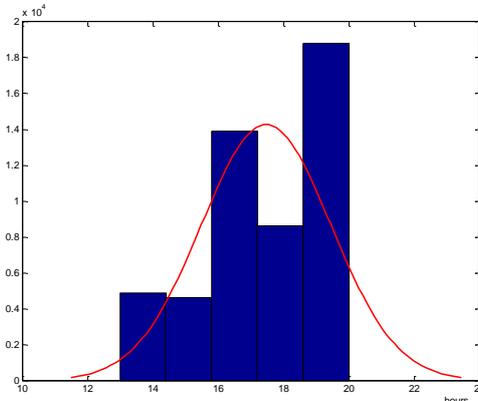


Figure 10. Distribution de REEL avec $EEI_{Threshold} = 0.15$

6. Conclusions

Dans ce papier, les principaux concepts d'efficacité énergétique (EE) ont été positionnés et classés selon les niveaux de décision associés. Un concept d'EE pour des systèmes industriels est investigué plus précisément afin d'en évaluer l'impact en termes de décision de maintenance. En ce sens un indicateur d'efficacité énergétique de type SEC a été introduit. Pour quantifier cet indicateur, une formulation mathématique est proposée à la fois au niveau d'un composant mais aussi au niveau d'une fonction ou d'un système. En outre, un nouveau concept est défini et nommé REEL, permettant de calculer la durée de vie résiduelle énergétique d'un composant/système. La REEL est un outil pertinent pour aider à la prise de décision en maintenance principalement prévisionnelle afin de réduire la consommation énergétique. En outre, ce papier propose une approche générique de pronostic permettant de prédire l'évolution du SEC et donc calculer la REEL au niveau composant et au niveau fonction/système. Enfin, nos propositions sont appliquées sur la plateforme d'intégration en télémaintenance TELMA. Les résultats numériques montrent que ces propositions conceptuelles et analytiques pour l'évaluation de l'indicateur d'efficacité énergétique semblent efficaces et adaptées pour aider à la prise de décision. Il faut cependant que ces propositions soient validées sur des systèmes industriels réels pour démontrer leur véritable valeur ajoutée. C'est une perspective majeure à ce travail en considérant que la prise en compte des résultats du SEC et de son pronostic avec d'autres indicateurs plus conventionnels, pour aider à la prise de décision en maintenance, est un second axe de perspective primordiale.

Bibliographie

Al-mofleh A. (2009). Prospective of Energy Efficiency Practice, Indicator and Power Supplies Efficiency. *Morden Appl. Sci.* vol. 3, p. 158–161.

- Ang B.W. (2006). Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy–GDP ratio to composite efficiency index. *Energy Policy* vol. 34, p. 574–582.
- Ang B.W., Xu X.Y. (2013). Tracking industrial energy efficiency trends using index decomposition analysis. *Energy Econ.* vol. 40, p. 1014–1021.
- Bertoldi P., Rezessy S., Oikonomou V. (2013). Rewarding energy savings rather than energy efficiency: Exploring the concept of a feed-in tariff for energy savings. *Energy Policy* vol. 56, p. 526–535.
- Boardman B. (2004). Achieving energy efficiency through product policy: the UK experience. *Environ. Sci. Policy* vol. 7, p. 165–176.
- Chan D.Y.-L., Huang C.-F., Lin W.-C., Hong G.-B. (2014). Energy efficiency benchmarking of energy-intensive industries in Taiwan. *Energy Convers. Manag.* vol. 77, p. 216–220.
- Do P., Barros A., Bérenguer C., Bouvard K., Brissaud F. (2013). Dynamic grouping maintenance with time limited opportunities. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* vol. 120, p. 51–59.
- Do P., Voisin A., Levrat E., Iung B. (2015). Condition-based maintenance with both perfect and imperfect maintenance actions. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* vol. 133, p. 22–32.
- Do P., Levrat E., Voisin A., Iung B. (2012). Remaining useful life (RUL) based maintenance decision making for deteriorating systems, *2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology (A-Mest'12)*.
- Dragomir O.E., Gouriveau R., Dragomir F., Minca E., Zerhouni N. (2009). Review of Prognostic Problem in Condition-Based Maintenance. *European Control Conference, ECC'09*, Budapest, Hungary.
- Fan J., Yung K.-C., Pecht M. (2014). Prognostics of lumen maintenance for High power white light emitting diodes using a nonlinear filter-based approach. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 123, p. 63–72.
- Fysikopoulos A., Anagnostakis D., Salonitis K., Chryssolouris G. (2012). An Empirical Study of the Energy Consumption in Automotive Assembly, *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems*.
- Gavankar S., Geyer R. (2011). *The rebound effect: State of the Debate and Implications for Energy Efficiency Research*, Institute of Energy Efficiency (UCSB).
- Giacone E., Manco S. (2012). Energy efficiency measurement in industrial processes. *Energy* vol. 38, p. 331–345.
- Goebel K., Saha B., Saxena A. (2008). A comparison of three data-driven techniques for prognostics, *62nd Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*.
- Gvozdenac-Urosevic B. (2010). Energy efficiency and GDP. *Therm. Sci.* vol. 14, p. 799–808.
- Iung B., Levrat E., Marquez A.C., Erbe H. (2009). Conceptual framework for e-Maintenance: Illustration by e-Maintenance technologies and platforms. *Annu. Rev. Control* vol. 33, p. 220–229.
- Jollands N., Waide P., Ellis M., Onoda T., Laustsen J., Tanaka K., de T'Serclaes P., Barnsley I., Bradley R., Meier A. (2010). The 25 IEA energy efficiency policy recommendations to the G8 Gleneagles Plan of Action. *Energy Policy* vol. 38, p. 6409–6418.
- Lambert, J.G., Hall, C. a. S., Balogh, S., Gupta, A., Arnold, M., (2014). Energy, EROI and quality of life. *Energy Policy* vol. 64, p. 153–167.

- Medjaher K., Skima H., Zerhouni N. (2014). Condition assessment and fault prognostics of microelectromechanical systems. *Microelectron. Reliab.* vol. 54, p. 143–151.
- Muller A., Suhner M.-C., Jung B. (2008). Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* vol. 93, p. 234–253.
- Nicolai R., Dekker R. (1997). A Review of Multi-Component Maintenance Models with Economic Dependence. *Reliab. Soc. Saf.* p. 411–435.
- Reviewed P., Riverside C.S. (2013). Electronic Theses and Dissertations UC Riverside Mining Time Series Data: Moving from Toy Problems to Realistic Deployments A Dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Computer Science by.
- Ritz C., Streibig J.C. (2008). Nonlinear Regression with R. *Springer Science & Business Media*.
- Saidur R. (2010). A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 14, p. 877–898.
- Salonitis K., Ball P. (2013). Energy Efficient Manufacturing from Machine Tools to Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, vol. 7, p. 634–639.
- Sankararaman S., Goebel K. (2014). An uncertainty quantification framework for prognostics and condition-based monitoring. *16th AIAA Non-Deterministic Approaches Conf.*
- Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. (2011). Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. *Eur. J. Oper. Res.* vol. 213, p. 1–14.
- Steuwer D.S. (2013). *Energy efficiency governance: the case of white certificate instruments for energy efficiency in Europe*, Springer Fachmedien Wiesbaden, p. 27–48.
- Tanaka K. (2008). Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. *Energy Policy* vol. 36, p. 2887–2902.
- Trianni A., Cagno E., Thollander P., Backlund S. (2013). Barriers to industrial energy efficiency in foundries: a European comparison. *J. Clean. Prod.* vol. 40, p. 161–176.
- Tsvetanov T., Segerson K. (2013). Re-evaluating the role of energy efficiency standards: A behavioral economics approach. *J. Environ. Econ. Manage.* vol. 66, p. 347–363.
- Udphzrun R.D.Q.G. (2001). Monitoring energy efficiency performance in New Zealand: A conceptual and methodological framework. *Energy Efficiency and Conservation Authority*, September, New Zealand.
- Urban, J., Scasny, M., (2012). Exploring domestic energy-saving: The role of environmental concern and background variables. *Energy Policy* vol. 47, p. 69–80.
- Van Noortwijk J.M. (2009). A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* vol. 94, p. 2–21.
- Wang H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *Eur. J. Oper. Res.* vol. 139, p. 469–489.

Article reçu le : 8 juin 2015

Article accepté le : 7 octobre 2015