

**Machines de production efficaces dans la  
consommation d'énergie**

**Aides à la planification pour  
l'industrie MEM**

**Eviter une « exploitation sans bénéfice »**

## Eviter une « exploitation sans bénéfice »

La considération « ESB – exploitation sans bénéfice » vise à éviter une consommation d'énergie sans génération de valeur. Il s'agit d'évaluer l'impact ESB sur la consommation d'énergie sur une période d'analyse prolongée.

La façon la plus simple pour réduire l'effet ESB consiste à minimiser les procédés de production consommant de l'énergie sans apporter de bénéfice. De plus, il est possible de reconnaître, à l'aide d'analyses qualitatives et quantitatives (quoi que bien plus compliquées) des fonctions réglées de manière inadéquate. Des mesures sur des machines-outils ont révélé que le procédé lui-même n'offre que très peu de potentiel d'optimisation. Par contre, les fonctions directement liées au procédé et partiellement aussi les fonctions d'alimentation indépendantes du procédé, révèlent un potentiel d'amélioration considérable. L'exploitation de ce potentiel demande des mesures techniques qui ne sont que difficilement réalisables après coup.

### 1. Introduction

Les machines et appareils doivent avoir une fonction clairement déterminée pour obtenir un bénéfice. Au niveau des machines de production, cette fonction consiste à produire des biens. Cela ne va pas sans consommer de l'énergie. Si l'énergie est consommée en dehors des temps de production, alors il est question d'une « exploitation sans bénéfice », en bref, d'une situation ESB. Cette consommation inefficace peut être réduite de façon ciblée. Le dépliant présent explique comment procéder et donne des informations utiles.

La procédure générale pour analyser et améliorer l'efficacité énergétique se base sur une analyse de différentes machines de production. Elle peut être appliquée sur des machines et appareils les plus divers, pour autant qu'il soit possible de classer les notions de base définies plus bas.

Les bases empiriques servant à une estimation spécifique ainsi que les hypothèses heuristiques comme par exemple la pondération des potentiels d'amélioration détaillés dans un système, sont déterminées en fonction d'une analyse détaillée effectuée sur des machines-outils. Les machines-outils sont des machines de production fixes servant à la transformation des métaux. Elles se distinguent par la précision, la polyvalence et la complexité des pièces produites. Elles peuvent être exploitées indépendamment en tant qu'installation Stand-Alone ou en tant qu'élément d'une grande installation. Les données enregistrées comprennent des mesures et analyses détaillées effectuées sur deux douzaines de machines différentes. Les conclusions peuvent servir d'idée ou d'instruction et doivent, si nécessaire, être adaptées aux qualités et conditions de l'unité analysée. Pour faciliter la tâche, l'unité sous analyse devrait être une unité facilement contrôlable à vue d'œil.

### 2. Notions et délimitation des systèmes

ISO 9000:2005 (3.2.15) définit l'**Efficiency** comme « le rapport entre le résultat obtenu et les ressources utilisées ». Par conséquent, pour déterminer l'efficacité, nous avons besoin de quantifier le résultat et les ressources à l'aide de mesures, de calculs ou d'estimations.

Il suffit pour déterminer l'efficacité énergétique de saisir les ressources énergétiques. Selon le type de machine ou d'appareil, ceci peut être plus ou moins compliqué. L'alimentation en électricité peut être mesurée de manière relativement simple. Dès qu'il s'agit de mesurer l'air comprimée, l'eau réfrigérante, les flux d'air et autre flux énergétiques, les instruments de mesure sont plus coûteux, moins précis et le mesurage devient compliqué. Ceci est une des raisons pour lesquelles la prise de conscience à l'égard de la consommation d'énergie est nettement moins grande lorsqu'il s'agit de ce genre d'énergie.

Les difficultés augmentent dès qu'il s'agit de quantifier les résultats. Un résultat facile à vérifier est donc souvent utilisé pour effectuer des comparaisons. Un procédé de production particulier ou une pièce manufactu-

rée sont de rigueur pour effectuer des comparaisons. Il va de soi que l'on peut admettre que des modifications à la machine ou à l'appareil ne changent rien au résultat.

Les choses sont moins compliquées lorsque l'exploitation observée ne génère pas de bénéfice. Dans ce cas, le bénéfice, donc le résultat, est nul. Dans un tel cas, chaque ressource utilisée n'est autre que du gaspillage et contribue à l'inefficience.

Dans un certain sens, cette observation n'est pas représentative. Résultat et bénéfice sont des notions générales dont la quantification peut varier. Une machine de production qui produit 24 heures sur 24 des pièces identiques d'une faible valeur va générer moins de bénéfice qu'une machine employée de manière flexible et qui produit différentes pièces dans une quantité et à un moment définis selon les besoins. Une telle machine occasionne aussi des temps d'arrêt, nécessaires pour le changement d'équipement et autres besoins logistiques, qui sont acceptés étant donné que malgré cela, le bénéfice augmente globalement. Ces périodes d'arrêt produisent malgré tout un petit bénéfice. Les machines et appareils opèrent sur plusieurs **modes de fonctionnement** qui, pour faciliter l'observation pratique, peuvent être réduits à trois:

- A) En service avec objectif de fonction, procédé en cours, appelé ci-après « **production** »;
- B) Opérationnel, exploitation à bénéfice partiel, appelé ci-après « **fonctionnel** »;
- C) « **Arrêt** »

Dans le domaine des bâtiments il est question de **convenabilité relative au site et aux besoins**: une fonction ne doit être exploitée que si elle est nécessaire et, le cas échéant, qu'en fonction des besoins. Ces deux notions sont transposables sur des machines et appareils productifs ou sur leur réglage et celui de leurs composants. Elles sont donc par la suite utilisées comme notions établies, bien qu'elles aient leur origine dans un tout autre contexte et qu'elles doivent être comprises dans un sens figuré.

- convenabilité relative au site: la fonction n'est exploitée que si elle est nécessaire ;
- convenabilité relative aux besoins: la quantité est adaptée aux besoins.

Figure 1 montre les **limites du système servant à contrôler la consommation d'énergie** sur une machine de production et par extension sur le flux des matériaux. Pour l'exploitation sans bénéfice il n'est tenu compte que de l'énergie, donc de la partie supérieure de la figure 1. La consommation de substances auxiliaires ou de matériaux bruts, par exemple lors du rodage d'un procédé, pourrait également être intéressante. Dans ce cas nous renonçons à une étude approfondie.

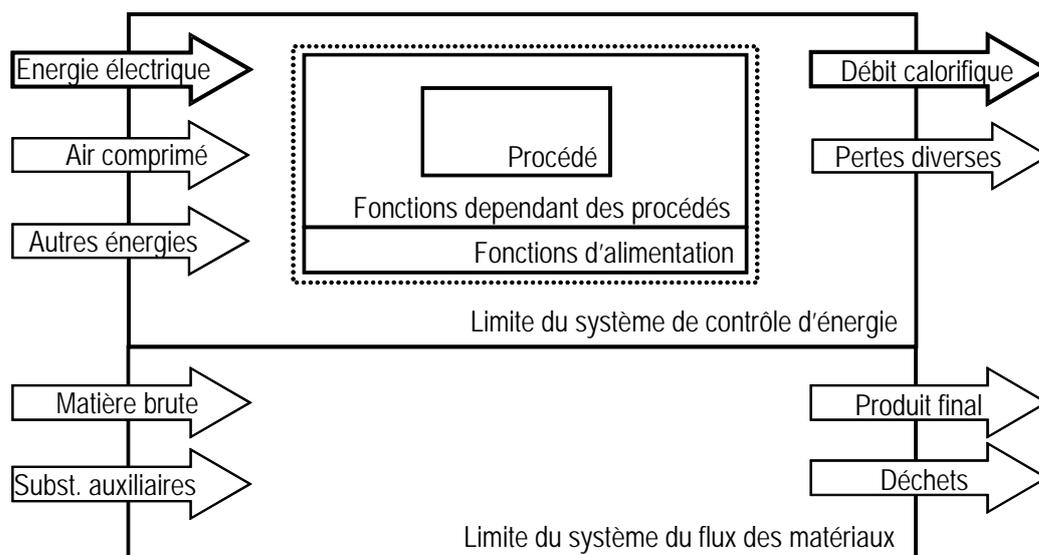


Figure 1: limites du système simplifiées sur machines et appareils

Au niveau de l'unité observée (cf. figure 1), l'énergie nécessaire est attribuée à trois domaines:

- a) Aux **procédés**
- b) aux **fonctions dépendantes du procédé**
- c) aux **fonctions d'alimentation.**

On appelle procédé la transformation d'énergie qui est le facteur majeur et qui détermine essentiellement le bénéfice, la quantité, la qualité et autres données clés. Il est question d'un procédé mécanique lorsqu'il s'agit d'un entraînement principal, tandis que les autres fonctions sont considérées comme entraînements secondaires.

Des **fonctions dépendantes du procédé** sont indispensables selon l'intensité du procédé, de manière typique lors du refroidissement ou conditionnement des zones du procédé, de l'alimentation en matériaux bruts et auxiliaires et lors de l'extraction des pièces fabriquées ou de l'élimination des déchets.

Les **fonctions d'alimentation** sont en grande partie indépendantes. Leur approvisionnement en énergie est commandé par des données déterminées. Par exemple l'alimentation en tension continue des circuits de sécurité ou d'air de barrage pour la protection de composants sensibles à la salissure ou à l'humidité.

### 3. Détermination de la pertinence

Les mesures en faveur de l'amélioration de l'efficacité énergétique, comme l'optimisation de l'exploitation sans bénéfice, doivent avoir un avantage économique. C'est pourquoi il est important, avant d'entreprendre des mesures, de déterminer la **pertinence**, la signification absolue et relative de l'exploitation sans bénéfice. Pour cela, il faudra calculer la consommation d'énergie dans les différents modes d'exploitation sur une période représentative à l'aide d'un **scénario de marche** correspondant à l'exploitation habituelle.

Afin de pouvoir tenir compte également des variations saisonnières du degré opérationnel, du marché et des températures, une **période d'observation** d'un an est adéquate. Il est indispensable de mesurer l'énergie apportée à la machine dans chaque mode de fonction. La **période de mesure** peut être raccourcie. L'idéal est d'effectuer la saisie des trois modes de fonction cités pendant une semaine.

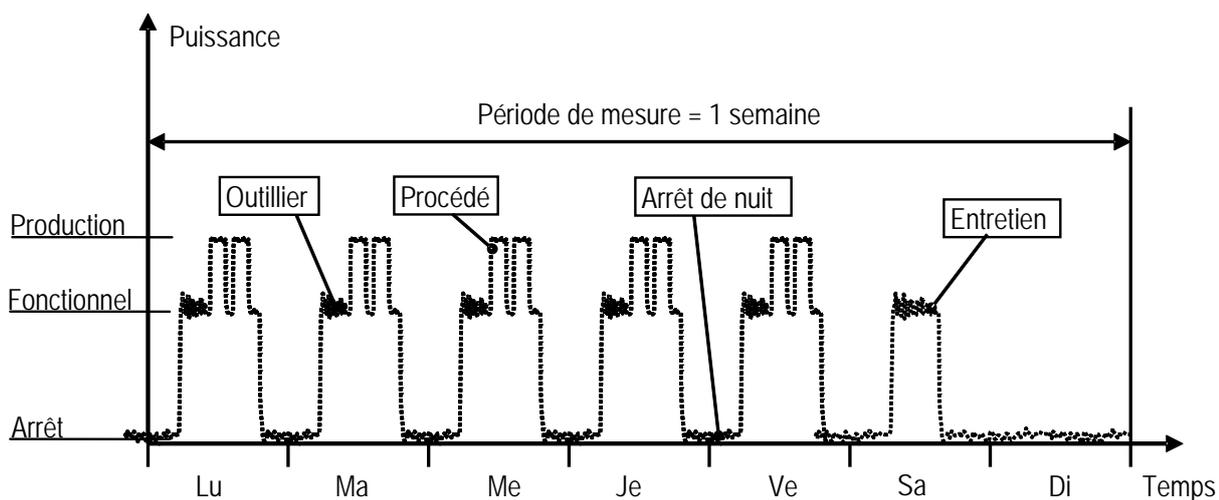


Figure 2: exemple du profil de puissance d'une machine

La Figure 2 présente le profil de puissance typique d'une machine sur une période de mesure d'une semaine. Nous y reconnaissons trois niveaux de performance attribués aux modes « production », « fonctionnel », « arrêt », indépendamment de l'activité en cours en mode « fonctionnel ».

L'estimation de la part des modes de fonctionnement sur un an, de concert avec les niveaux de puissance mesurés, permet de reconnaître la pertinence des modes de fonctionnement.

**Tableau 1: calcul de la pertinence des modes de fonctionnement**

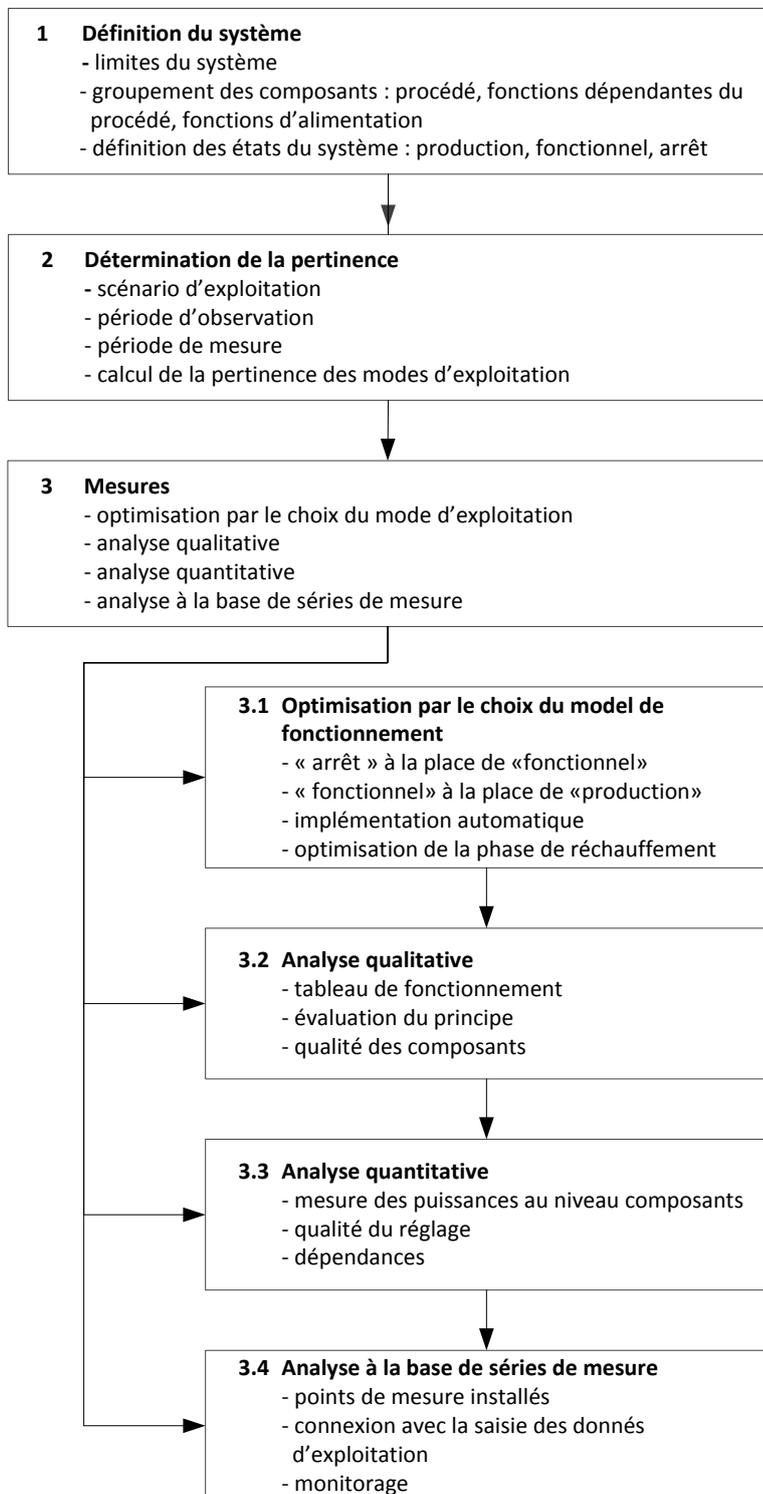
	Modes de fonctionnement			Total
	Production	Fonctionnel	Arrêt	
Fraction de temps	20%	30%	50%	100%
Heures par année	1752	2628	4380	8760
Niveau de performance typique	20 kW	13kW	0.2kW	
Energie / an	35'040 kWh	34'164 kWh	876 kWh	70'080 kWh
Part en énergie	50%	49%	1%	100%
Coûts d'énergie @ 0.15 CHF / kWh	5'256 CHF	5'125 CHF	131 CHF	10'512 CHF

Dans cet exemple, le mode « fonctionnel », soit le mode classique pour optimiser l'exploitation sans bénéfice, sort du lot, tandis qu'en mode « arrêt » le potentiel est relativement faible malgré la longue durée. La somme absolue révèle les coûts possibles pour d'éventuelles mesures techniques entreprises dans le but d'améliorer également le facteur économique. En règle générale, une modification technique proactive ne peut pas être justifiée uniquement par des motifs d'économie. La situation n'est pas la même si de toute façon des travaux de réparation ou d'entretien doivent être effectués et que seuls les coûts marginaux occasionnés par des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique sont à prendre en charge.

## 4. Interprétation des mesures

Pour effectuer une analyse et pour éviter une situation ESB, il est possible de procéder selon le diagramme suivant.

### ESB – Procédure générale



Les diverses mesures sont expliquées en détail ci-dessous.

### Optimisation par le choix du mode de fonctionnement (3.1)

L'optimisation qui s'impose est de sélectionner le **mode de fonctionnement** « arrêt » à la place du mode « fonctionnel ». Ceci peut être effectué par l'intermédiaire soit de mesures opérationnelles ou techniques, ce qui est dans tous les cas meilleure, étant donné que ceci se fait de manière automatique. Sous certaines conditions, il est aussi possible que le mode « production » passe en mode « fonctionnel » si le procédé est interrompu pour un court moment, par exemple pour un travail sur une pièce. De telles mesures sont utiles si elles peuvent être programmées ou automatisées. Sans quoi, elles ne sont pas appliquées dans la pratique.

Le changement des modes « fonctionnel » et « arrêt » peut durer quelque temps, notamment s'il s'agit d'obtenir une balance de la température et d'arrêter le système de pilotage. Ceci est la raison la plus fréquente d'une exploitation sans bénéfice. Dans certains cas il est possible qu'un changement de mode forcé puisse nuire à la durée de vie du système. Ceci est cependant moins probable pour les machines et appareils modernes.

Chaque possibilité supplémentaire servant à éviter une exploitation sans bénéfice exige des modifications dans l'équipement de la machine. L'attention correspondante doit être apportée à la durée des changements de modes lorsqu'il s'agit de nouvelles constructions ou d'acquisitions. Des fonctions Stand-By proprement réglées peuvent considérablement raccourcir cette durée.

### Analyses qualitatives (3.2)

Une analyse qualitative sert à élaborer des possibilités pour optimiser l'efficacité énergétique sans devoir effectuer des mesures détaillées. Dans de nombreux cas il est possible de détecter et d'exploiter des potentiels. Une analyse des systèmes secondaires et des composants, résumés ci-après en **composants**, est incontournable. Les procédures suivantes sont possibles:

- élaboration d'un **tableau de fonctionnement**: quels composants sont en service dans quel mode de fonctionnement?
- **Évaluation du principe**: le principe appliqué pour exploiter une fonction est-il utile?
- **Qualité des composants**: les composants utilisés correspondent-ils à l'état de l'art actuel?

Une mesure qualitative ne s'oriente pas seulement aux « suspects habituels », à l'image d'une liste de contrôle de la norme ISO DIS 19455-1 (en stade de projet). Elle vise en particulier à reconnaître des mauvaises adaptations au niveau de l'utilisation. Souvent, des machines de production ne sont pas exploitées conformément à leurs fonctions d'origine. Ceci peut occasionner de l'inefficacité qui peut être reconnue à l'aide d'une analyse qualitative.

### Analyses quantitatives (3.3)

Une analyse de système supplémentaire exige des mesures jusqu'au niveau des composants. La Figure 3 présente le profil de puissance d'un procédé de fraisage. A noter toutefois que plusieurs composants ont été mesurés individuellement et présentés de manière cumulée. La Figure 4 montre une séquence qui rend perceptible le comportement de différents composants. Il est évident qu'à l'aide d'une mesure détaillée des composants, l'information sur les modes de fonctionnement mesurés acquise avec une analyse qualitative (cf. 3.2), devient directement perceptible. La qualité de réglage de différents composants aux faibles fluctuations saute aux yeux.

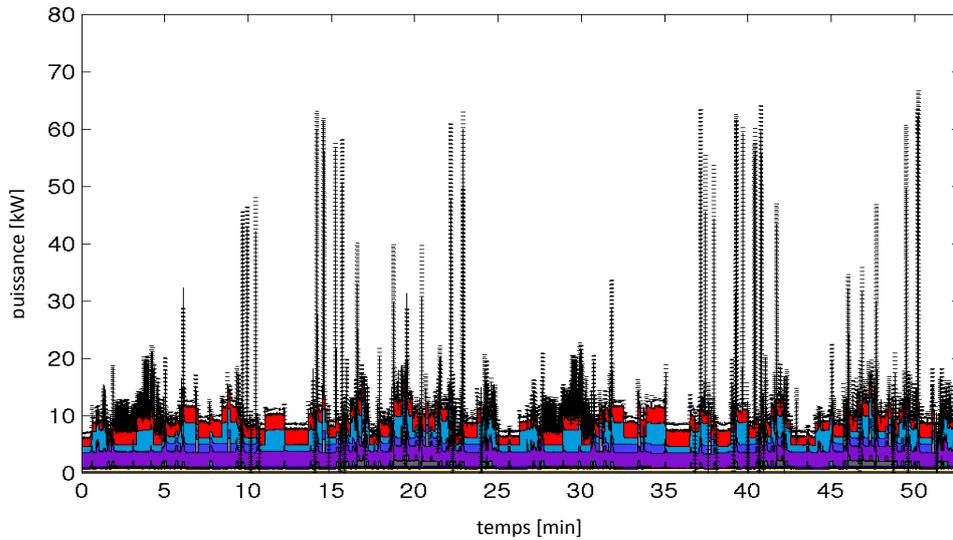


Figure 3: profil de puissance du procédé de fraisage avec des pointes de performance lors du démarrage de l'arbre après un changement d'armement; présentation résumée

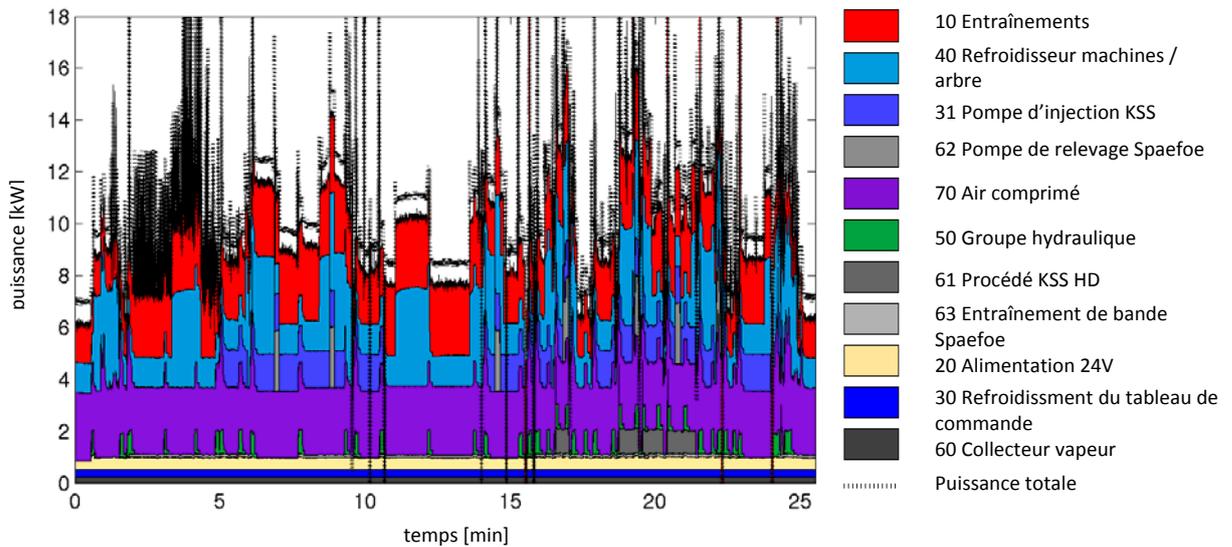


Figure 4: Extrait de profil de puissance des composants de machines lors d'un procédé de fraisage

#### Analyse à la base de séries de mesures pour la détection de dépendances (3.4)

La représentativité insuffisante, par exemple en cas de fortes variations de la température ambiante en cours d'année, est le désavantage d'une analyse quantitative ponctuelle. Pour des installations de plus grande taille, l'installation de points de mesure servant à une surveillance continue, peut contribuer à détecter encore mieux les dépendances.

## 5. Exemples d'analyses et de mesures

### Conclusions empiriques

En raison de la base empirique des machines-outils, il est possible de faire une déclaration générale sur la pertinence des trois domaines

- Procédé
- Fonctions dépendantes des procédés
- Fonctions d'approvisionnement.

La pertinence est pratiquement indépendante du genre de procédé, qu'il s'agisse d'une coupe classique effectuée avec un liquide de coupe, d'un usinage à sec, d'un procédé électrochimique ou d'un traitement au laser. A la rigueur, la fonction par exemple de refroidissement peut être différente si on refroidit directement le procédé et/ou les composants de la machine.

La puissance du procédé est à chaque fois en rouge, l'énergie de refroidissement en bleu et les différentes fonctions d'approvisionnement en d'autres couleurs.

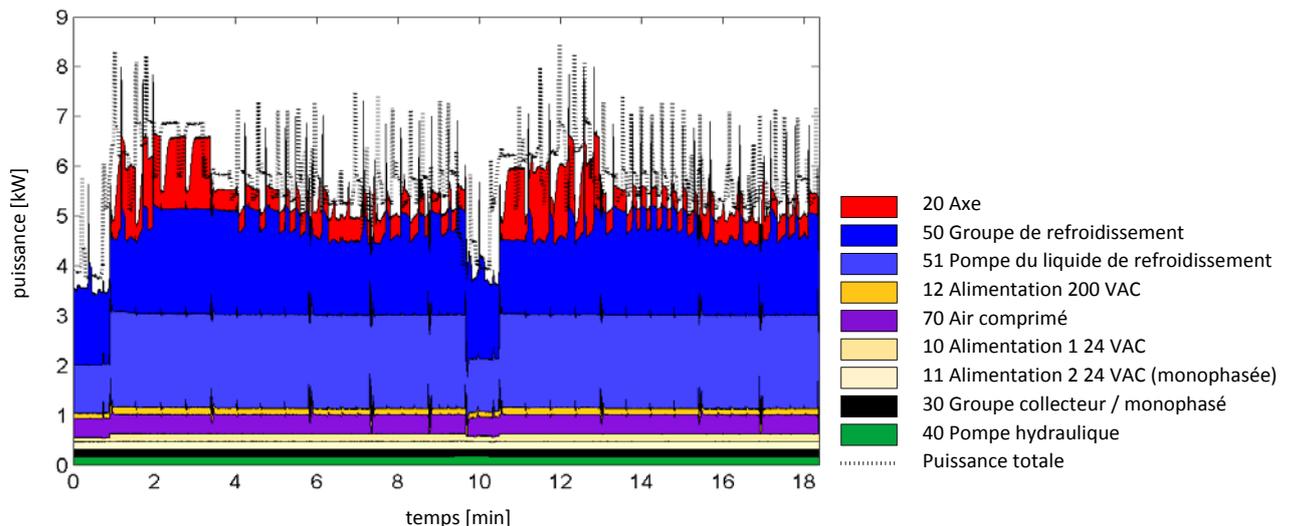


Figure 5: profil de puissance sur une petite meuleuse dans un procédé avec refroidissement

Les Figure 2 et Figure 3 présentent un profil de puissance typique pour un procédé de fraisage dans un centre de traitement. La Figure 5 montre un profil de puissance d'une affûteuse de petite taille en cours de procédé avec refroidissement. La part importante d'énergie pour le refroidissement est flagrante. En comparaison, la coupe au laser est un procédé sans besoin de refroidissement. Malgré cela, la Figure 6 dévoile qu'une grande partie de l'énergie est utilisée pour le refroidissement, dans ce cas pour le refroidissement du laser. Les déclarations suivantes sont dérivées d'un grand nombre de mesures comparables.

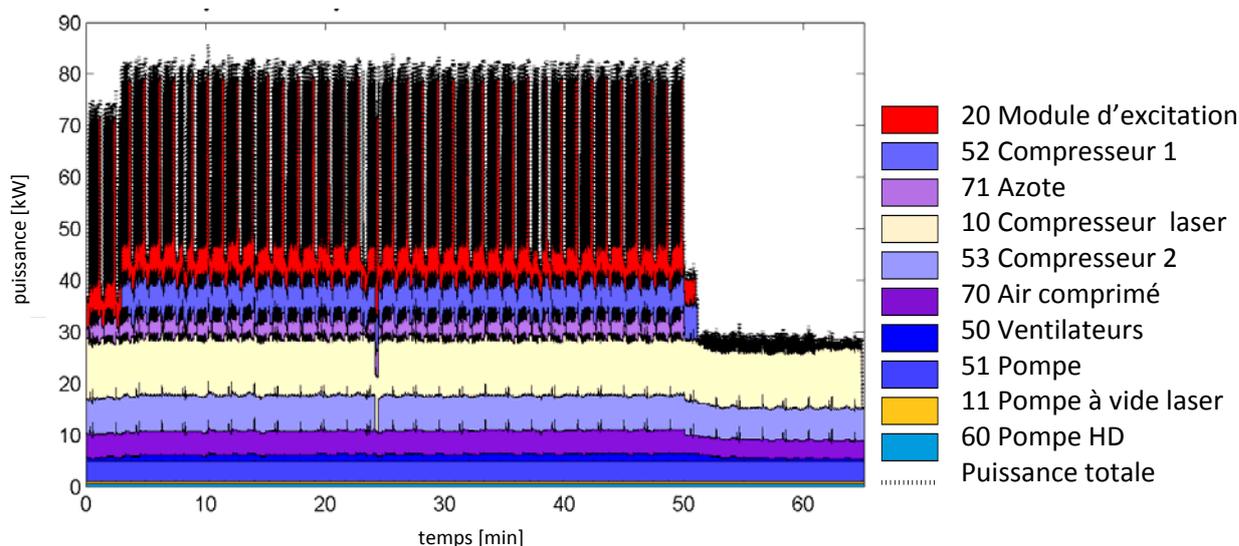


Figure 6: profil de puissance du procédé avec une machine de coupe au laser

La part du **procédé** est chiffrée à environ un tiers du total de l'énergie nécessaire. Les entraînements pour le procédé et les appareils sont bien optimisés. Ceci peut être imputé à des efforts d'optimisation menés depuis de longues années. Le potentiel d'optimisation pour ce secteur est donc relativement faible, à moins de modifier fondamentalement le procédé, p.ex. finition à sec à la place d'une finition avec refroidissement.

Par conséquent, des possibilités d'intervention idéales sont:

- Les **fonctions dépendantes du procédé** constituent le bloc le plus important, souvent non optimisé individuellement. C'est de ce secteur que découle le plus grand potentiel d'optimisation. Le fait que les composants soient multiples et servent à des fonctions diverses complique la tâche.
- La part des **fonctions d'approvisionnement** à la puissance absorbée est moins importante. Elles sont souvent négligées et par conséquent parfois réglées ni en fonction des besoins, ni de la présence de l'opérateur. Malgré la faible proportion, il est possible d'obtenir un potentiel d'optimisation moyen précisément lorsque les périodes improductives sont nombreuses.

Ces déclarations sont résumées de manière détaillée dans le **Tableau 2**.

Tableau 2: résumé des fractions de performance et du potentiel d'optimisation sur les machines-outils

	Exemples	Considération	Potentiel d'optimisation par secteur	Potentiel d'optimisation global	Solutions techniques possibles
<b>Procédé</b>	Arbre, entraînement principal	••	•	•	Augmentation de la vitesse, augmentation de la performance des procédés
<b>Fonctions indépendantes des procédés</b>	Pompe de refroidissement	•••	•••	•••	Réglage indépendant du procédé
<b>Fonctions d'approvisionnement</b>	Alimentation 24V, hydraulique pour éléments de serrage	•	(•••) important selon le cas	(••) cas par cas	Composants efficaces, exploitation selon les besoins

## Listes de contrôle concernant les machines servant à la transformation des métaux

Tout au long de la vie d'une machine, il est possible d'envisager et éventuellement d'entreprendre des mesures proposées dans une liste de contrôle. Peu de mesures seulement peuvent être réalisées inconditionnellement, étant donné qu'il faut analyser la charge de travail et le bénéfice dans chaque contexte individuel. Le projet de normes **ISO/DIS 14955-1** contient des listes de contrôle pour les machines servant à la transformation des métaux sous forme de coupe ou de transformation. Certains points, concernant spécifiquement l'ESB, sont listés ci-dessous de façon sommaire.

Exigences	Mesures	Commentaire
Temps de réchauffement courts	Optimisations structurelles ou compensation thermique automatique	Il est possible d'établir des modèles d'effets thermiques systématiques et de les compenser en conséquence.
Axes fixes sans puissance absorbée	Axes à l'arrêt bloqués	
Démarrage et arrêt faciles	Procédés de démarrage et d'arrêt intelligents	Des procédures complexes pour le démarrage et l'arrêt d'installations risquent de dissuader les opérateurs d'arrêter l'installation lors d'un non-usage temporaire.
Minimisation des périodes improductives	En diminuant les périodes improductives, l'ESB est réduite.	Des périodes improductives sont déjà minimisées pour des raisons économiques.
Paramètres énergétiquement optimisés	Les différents modes d'exploitation sont optimisés énergétiquement en fixant des valeurs clés.	Implémentation dans la commande de la machine
Optimisation énergétique dynamique	L'ESB est détectée à l'aide d'un réglage adaptable. Le mode d'exploitation le plus économe est sélectionné.	Les phases de réchauffement et de refroidissement sont délicates si les antécédents et/ou la planification doivent être pris en compte.
Sélection automatique du mode d'exploitation	Dans des situations typiques, le mode d'exploitation idéal est automatiquement sélectionné.	Les possibilités pour le typage de situations sont limitées, p.ex. arrêt à la fin d'un procédé de finition en service automatisé.
Minimiser les pertes au niveau de la pression d'air	Des éléments de l'installation hors service devraient pouvoir être débranchés.	Une optimisation ESB exige des possibilités d'intervention ciblées.
Refroidissement/lubrification adéquats	Réglage adéquat de la pression et du flux du fluide de refroidissement en fonction du besoin de refroidissement et de lubrification.	La double fonction du refroidissement et de la lubrification doit être considérée séparément en vue de l'optimisation. En cas de besoin prioritaire de lubrification, une lubrification à l'huile peut être un avantage (lubrification à quantité minimale).
Refroidissement de la machine adéquate	Flux réglable des circuits de refroidissement, p.ex. en fonction de la température.	Un refroidissement réglé augmente généralement aussi le bénéfice en raison de conditions de production plus stables. Des systèmes de petite taille, facile à régler peuvent être conçus à l'aide d'éléments Peltier.
Dimensionnement des systèmes hydrauliques	Les systèmes hydrauliques sont à dimensionner de sorte que l'ESB puisse être réduite.	L'analyse et la simulation du comportement attendu du système lors du développement permettent un dimensionnement adéquat. Les systèmes ne peuvent être réglés que si le dimensionnement est adéquat.
Synchronisation du niveau de pression des composants hydrauliques	Minimiser les réserves de pression et utiliser des composants de pression nominale égale.	Les réserves de pression et des pressions nominales différentes compliquent le dimensionnement et diminuent les possibilités d'une optimisation de l'exploitation. Si cela est indispensable, utiliser deux systèmes d'alimentation aux pressions différentes.
Périphéries commandables	Les appareils périphériques comme pour les collecteurs de brouillard ou transporteur de copeaux doivent être commandés, p.ex. via la programmation du procédé de finition.	Selon l'état de la technique, les appareils périphériques dépendent souvent uniquement du régime de fonctionnement et ne peuvent par conséquent pas être exploités de manière adéquate.

## 6. Informations supplémentaires

Vous trouverez des informations supplémentaires sur le thème de l'efficacité énergétique et l'exploitation sans bénéfice sur les sites Internet suivants:

- Suisseénergie, [www.suisseenergie.ch](http://www.suisseenergie.ch) (entreprises)
- Office fédéral de l'énergie OFEN, [www.ofen.admin.ch](http://www.ofen.admin.ch)  
(Thèmes/efficacité énergétique/optimisation des procédés industrie et prestations de services)
- Swissmem, [www.swissmem.ch/fr](http://www.swissmem.ch/fr) (Thèmes/énergie & environnement)
- Agence de l'énergie pour l'économie AEnEC, [www.aenec.ch](http://www.aenec.ch)

## 7. Organisations et entreprises participantes

Equipe du projet:

Sonja Studer, Swissmem (responsable générale du projet)

Rainer Züst, Züst Engineering AG (responsable de projet)

Lukas Weiss, inspire AG, EPF Zürich

Beat Wellig, Hochschule Luzern

Entreprises:

ABB Turbo Systems AG (Christian Zott), Bühler AG (Fritz Langenegger, Roland Zwingli), Bystronic (Adolf Lauper), ESCO SA (Pierre-Louis Piguët), Grundfos Pumpen AG (Peter Egger), Helbling Technik AG (Guido Brunecker), Rollomatic SA (Pierre Pahud), Sulzer Pumpen (Sabine Sulzer), TRUMPF Maschinen AG (Thomas Bewer)

Ce projet a été soutenu financièrement par l'Office fédéral de l'énergie OFEN.