

}
}

Dossier :
**EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE**

Extrait de LA REVUE **forge et fonderie** n° 33



FEDERATION FORGE FONDERIE

45, rue Louis Blanc - F-92400 COURBEVOIE

Adresse Postale : CS 30080 F-92038 LA DEFENSE Cedex

Téléphone : +33 (0)1 43 34 76 30 - contact@forgefonderie.org - www.forgefonderie.org

Guide sur l'efficacité énergétique des usages thermiques en forge et en fonderie



Depuis un an et demi, les entreprises industrielles, et notamment les forges et les fonderies, font face à de très fortes augmentations des coûts de l'énergie. Celles-ci ont des conséquences importantes sur les marges, sur la compétitivité face aux exportations et sur la compétitivité des clients lorsque des hausses de tarifs leurs sont répercutées.

Dans ce contexte, il nous a donc semblé indispensable de mettre en avant, au travers d'un guide, les bonnes pratiques en matière d'efficacité énergétique sur les usages thermiques en forge et en fonderie. Le but est d'accompagner la profession dans une meilleure maîtrise des factures d'énergie. Nous avons choisi de ne traiter que des usages thermiques car ce sont généralement les principaux postes de consommation.

Ce guide, commandité conjointement par GRDF, la FFF et l'Alliance Alice, s'appuie sur l'expertise technique du CETIAT, qui en est le rédacteur. Il sera disponible gratuitement à partir du printemps, notamment sur le site de la fédération.

Des actions simples à mettre en œuvre

L'objectif de ce guide est d'inciter les entreprises à avancer sur le sujet de l'efficacité énergétique en proposant des actions pragmatiques et simples à mettre en œuvre, avec un CAPEX faible et un temps de retour sur investissement rapide.

Le guide est composé de 18 fiches-actions organisées en deux parties :

1. Les fours et outils de chauffe

- Vérification de l'étanchéité des portes de fours
- Vérification et renforcement de l'isolation des fours
- Couverture des canaux de circulation du métal en fusion pour limiter les pertes par rayonnement
- Contrôle et réduction du temps d'ouverture des portes de four
- S'assurer de l'adéquation du diamètre du lopin avec la plage de l'inducteur dans les fours à induction pour les forges
- Utilisation/installation de couvercles sur les enceintes chauffées (fours, poches, ...)
- Maintien d'une pression appropriée dans le four pour éviter les entrées d'air parasite ou les sorties de fumées non contrôlées
- Réglage de la combustion à la stœchiométrie pour les fours à gaz

2. Mesures organisationnelles ou de conception

- Mise en place et suivi d'indicateurs de performance énergétique sur les gros postes de consommation
- Analyse du talon de consommation
- Réflexion sur les facteurs organisationnels et humains qui permettent d'optimiser le cycle de production d'un point de vue énergétique (réduction des attentes, des charges à vide, des refroidissements/perde de matière)
- Organiser les équipes de production pour travailler principalement pendant les heures creuses
- Vérification métrologique de l'instrumentation du four (T°C/ pression/ débits air /gaz)
- Optimisation des températures de consigne afin d'ajuster la chauffe au plus près du besoin réel
- Installation de sous-compteurs d'énergie sur les fours
- Entretien des échangeurs de chaleur pour limiter l'encrassement
- Maitriser les temps de chauffe et de refroidissement des fours, les intégrer dans la gestion de production afin d'optimiser l'engagement des fours et autres équipements de chauffe
- Utilisation de la simulation numérique pour optimiser les masselottes et jets de coulées et ainsi réduire l'énergie consommée pour la fusion du métal

Des fiches-actions très opérationnelles

Les 18 fiches-actions sont conçues pour être très opérationnelles et sont pensées à la fois pour les équipes de direction (décideurs, responsables études/travaux, ...) et pour les équipes présentes sur le terrain (production, maintenance, ...).

Elles sont structurées de la manière suivante :

- Contexte et enjeux : une brève présentation des objectifs visés dans la fiche,
- Pour passer à l'action : la description de l'action à mettre en œuvre,
- Intérêt technico-économique de l'action,
- Financement : la présentation des dispositifs de financement public, s'il en existe,
- Retour d'expérience : dans la mesure du possible, un retour d'expérience d'un fondeur ou d'un forgeron est présenté.

Ont contribué à ce guide :

Romain CASALIGGI et Benjamin BRUYERE (CETIAT)
Berangère OUDIN, Yassir DKHISSI, Florian JACQUEMART,
Laurent LANTOINE (GRDF)
Joseph BOURGINE (Alliance Alice)
Nicolas CREON (Fédération Forge Fonderie)
Patrick HAIRY (CETIM- CTIF)
Muriel MAQUENNEHAN (CETIM)
Eric NOUMI (GRTgaz)



Sabeur JEDID
Ingénieur- Chef de
projets Fabrication
Additive
CETIM-CTIF

Approche durabilité en fabrication additive métallique

Focus sur la consommation d'énergie et les moyens d'optimisation avec étude de cas : Conformal Cooling

Contexte

L'industrie de la fabrication additive (FA) se développe rapidement, devenant ainsi une composante importante et intégrale de la révolution numérique dans les pratiques de fabrication. Bien que les aspects techniques de la FA fassent l'objet de recherches intensives, il reste encore de nombreux défis à relever afin de renforcer la durabilité et l'analyse de cycle de vie en fabrication additive, notamment métallique. En effet, la notion du développement durable est définie comme la création de produits utilisant des processus qui minimisent les impacts environnementaux négatifs en conservant l'énergie et les ressources naturelles dans un environnement socio-économique sain. A ce jour, il existe différents principes de durabilité largement adoptés dans les secteurs de la transformation. Cependant, la compréhension de la durabilité en fabrication additive est encore assez subjective. Il est généralement admis que la durabilité a trois dimensions distinctes : économique, sociale et environnementale.

Sur le plan économique, la fabrication additive a prouvé sa valeur pour soutenir la compétitivité dans le secteur manufacturier : elle offre de grandes possibilités d'innovation et simplifie la chaîne de production ce qui permet de réduire les coûts liés au stockage et à la logistique. De plus, la capacité de la fabrication additive à produire des pièces fonctionnelles en réduisant le nombre des assemblages améliore les performances du produit. La fabrication additive permet également de réduire les coûts opérationnels en réduisant, par exemple, le rapport « *buy to fly* » dans l'industrie aéronautique (rapport entre la masse de la matière mise en œuvre pour réaliser une pièce et la masse effective opérationnelle).

Sur le plan social, bien que les aspects environnementaux et les impacts économiques de la fabrication additive sont souvent pris en compte, l'étude de l'implication sociale de la fabrication additive est un sujet qui ne fait pas l'objet d'attention. Pourtant, l'impact social dans les domaines de l'emploi, de la consommation et de la sécurité est présent. Si l'on prend l'exemple de pays en développement n'ayant pas accès à la technologie pour fabriquer des produits complexes en utilisant les méthodes conventionnelles, ils peuvent à présent produire des pièces en utilisant cette technologie et ainsi se rapprocher de la fabrication de produits technologiquement complexes pour trouver leur place sur un marché très compétitif et de haute valeur ajoutée.

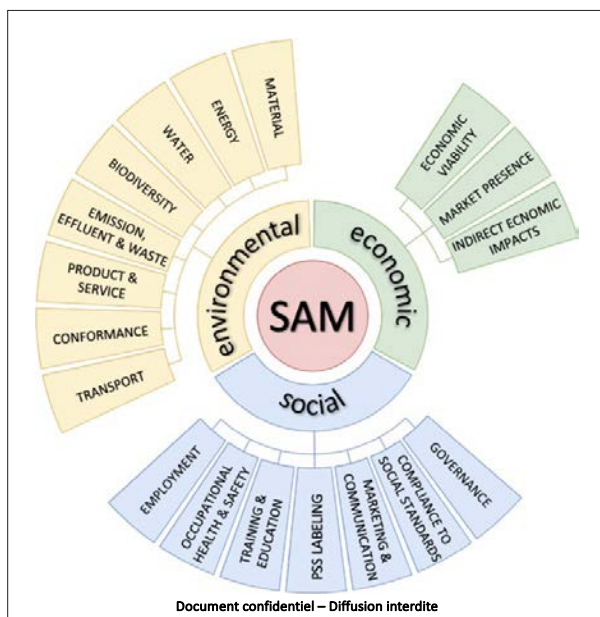


Figure 1 : Les trois dimensions de la S.A.M (Sustainability Additive Manufacturing) et les 18 sous-catégories de performance en matière de durabilité [8]

Les aspects environnementaux liés aux produits manufacturés prennent une place importante dans le paysage du développement durable. En effet, la fabrication dite « verte » est définie comme la première étape vers le développement durable. Elle jouera un rôle important dans ce développement au cours des prochaines années. La littérature propose plusieurs cadres pour étudier ces aspects, mais il n’y a pas de méthode quantitative uniforme pour évaluer leurs impacts. Parmi les méthodes les plus répandues pour évaluer les impacts environnementaux, on peut citer l’évaluation de l’impact environnemental (Environmental Impact Assessment - EIA) et l’analyse du cycle de vie (Life Cycle Assessment - LCA). Bien que différentes, ces méthodes ont en commun notamment l’analyse de la durée du processus et l’utilisation de l’énergie. Les technologies de fabrication additive peuvent avoir deux types d’impacts sur l’environnement : en premier lieu la consommation d’énergie pour la production et la transformation de la matière première, et en deuxième lieu les pollutions qu’elles peuvent provoquer à court, moyen et long terme sur l’environnement.

Nous nous focaliserons dans ce qui suit sur le volet énergétique de l’analyse de la durabilité et du cycle de vie pour la fabrication additive, à savoir la consommation d’énergie, en la comparant avec la fabrication conventionnelle.

Consommation d’énergie dans le secteur de l’industrie

La consommation mondiale d’énergie primaire s’élève à 14,3 Gtep (Milliards de tonnes équivalent pétrole) en 2018. C’est deux fois plus qu’en 1978 (7,0 Gtep), soit une croissance annuelle moyenne de 1,8 % avec un léger ralentissement sur la dernière décennie (+ 1,5 %). En Asie, le rythme de croissance moyen annuel entre 1978 et 2018 est très élevé (+ 3,7 %). L’Asie représente 41 % de la consommation mondiale en 2018, contre 20 % 40 ans auparavant, malgré un ralentissement de la croissance depuis 2013. En 2018, l’Europe, l’Amérique du Nord et la Russie représentent 38 % de la consommation mondiale d’énergie primaire, contre 67 % en 1978. La consommation y a toutefois globalement crû depuis 40 ans, à des rythmes moyens de

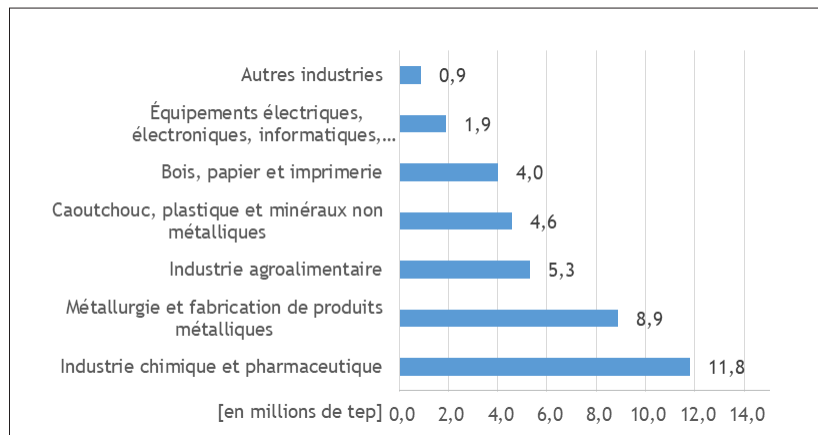


Figure 2 : Les consommations de l’industrie manufacturière française par branche en 2020 [16]

0,2 % par an en Europe et en Russie, et 0,5 % par an aux États-Unis et au Canada.

En France, les consommations d’énergie sont très inégalement réparties suivant les différents secteurs industriels. Les usages sont de plus très concentrés sur quelques-uns d’entre eux.

En effet, 1 % des sites industriels consomment deux tiers de l’énergie. Les secteurs les plus consommateurs restent la chimie, l’agroalimentaire, et la sidérurgie avec des profils de consommation relativement différents.

Consommation d’énergie en fabrication additive métallique

Le cycle de vie simplifié en fabrication additive (Figure 3) est divisé en quatre étapes majeures, de l’extraction à la transformation de la matière première en passant par la fabrication et l’usinage puis par l’usage, pour aboutir à la fin de vie et au recyclage si possible.

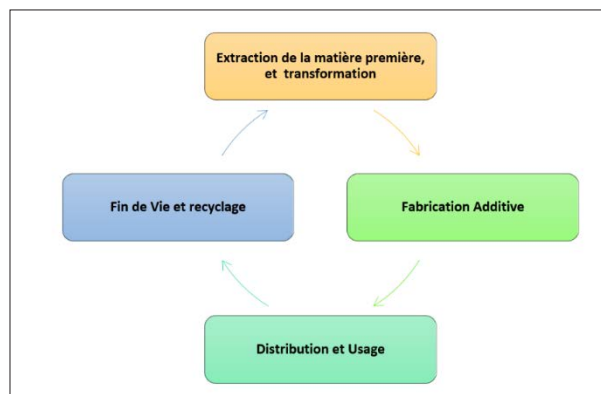


Figure 3 : Diagramme élémentaire des principaux stades de fabrication d’une pièce par fabrication additive métallique

Il est important de noter que, pour une analyse efficace, nous devons considérer l'ensemble du cycle de vie de la fabrication et observer que l'utilisation de l'énergie intervient tout au long de ce cycle de vie, dont la plus grande partie au moment de l'extraction de la matière, à hauteur de 45% de la consommation globale, puis 30 % pour la fabrication et le traitement thermique et enfin 20 % pour le recyclage et 5 % environ pour la distribution et le stockage.

Dans la cadre de la transition énergétique, la France prévoyait les objectifs suivants en termes de réduction de la consommation d'énergie par rapport à 2012 :

- Consommation finale d'énergie : - 7,5 % en 2023 et - 16,5 % en 2028 ;
- Consommation primaire de gaz naturel : - 10 % en 2023 et - 22 % en 2028 ;
- Consommation primaire de pétrole : - 19 % en 2023 et - 34 % en 2028 ;
- Consommation primaire de charbon : - 66 % en 2023 et - 80 % en 2028.

Consommation d'énergie pour la transformation des minerais

Les matières premières utilisées dans la fabrication additive métallique et l'usinage impliquent tous deux le même processus initial : le minerai est extrait et traité, puis le métal est coulé en lingot puis atomisé en cas de besoin en poudre. L'énergie consommée dans ces premières étapes doit ainsi être connue pour pouvoir calculer l'impact de cette transformation sur le cycle de vie. Les poudres métalliques par exemple peuvent être produites par une large gamme de techniques comme l'électrolyse, l'atomisation, les procédés chimiques et la fragmentation mécanique. Parmi ces procédés de transformation, l'atomisation est la plus utilisée et comprend généralement trois étapes : la fusion des matières premières, l'atomisation des produits intermédiaires et la solidification des poudres métalliques résultantes.

La consommation moyenne d'énergie pour le processus d'atomisation dépend du matériau appliqué, comme le montre le tableau 1, rapporté en kW.h/kg :

Alliage	Consommation d'énergie (kW.h/kg)
Ti-6Al-4V	2 et 11 (selon les paramètres du procédé)
AlSi10Mg	2,22
Inconel 625	15,5
Acier à outils	0,25

Tableau 1 : Consommation d'énergie moyenne d'un processus d'atomisation pour différents alliages

Un autre élément quantifiant les dépenses énergétiques pour la transformation des matériaux métalliques est l'énergie intrinsèque, c'est-à-dire la quantité d'énergie consommée lors du cycle de vie d'un matériau ou d'un produit depuis l'extraction et la transformation des matières premières nécessaires à sa production jusqu'à son recyclage, en passant par sa fabrication, son transport, son utilisation et son entretien. À l'exception notable de la phase d'utilisation, cette énergie est souvent une entité inconnue ou indirectement connue, au contraire de l'énergie liée à l'utilisation, que le consommateur connaît, ou peut connaître aisément. En cumulant l'ensemble des énergies consommées sur l'ensemble du cycle de vie, on peut prendre la mesure du besoin énergétique réel de transformation.

Consommation d'énergie par technologie additive métallique

La consommation totale d'énergie en fabrication additive métallique comprend l'énergie intrinsèque de transformation, l'énergie de fabrication fournie par le moyen d'apport en énergie, tel que le laser ou l'arc électrique et l'énergie secondaire utilisée pour le fonctionnement de la machine et du système. Les équipements de mise en route tels que les appareils de chauffage, les refroidisseurs, les pompes, les moteurs nécessaires pour le fonctionnement de la machine utilisée dans la fabrication contribuent principalement à augmenter la consommation globale d'énergie.

En effet, les principales technologies de fabrication additive métallique peuvent être classifiées par la nature de l'apport énergétique et également par le type de matière première. Elles sont généralement divisées en deux catégories : les technologies utilisant de la poudre métallique et les technologies utilisant du fil métallique (Figure 4).

La consommation d'énergie pendant le processus d'impression est estimée par l'énergie consommée pour imprimer une masse spécifique du matériau (kW.h/kg), également appelée *consommation d'énergie spécifique* (SEC).

La Figure 5 montre la consommation d'énergie pour différents procédés de FA métallique utilisant de la poudre métallique et du fil, y compris le procédé *Binder Jetting Powder* (BJP), basé sur le frittage de la poudre métallique par ajout de liant et les procédés *Bound Metal Deposition* (BMD) et *Metal Fused Filament Fabrication* (FFF), qui est une technique de MarkForged basée sur le dépôt de filaments de poudre préalablement mélangés avec un liant. Les données du graphique comparent les procédés cités avec de la fusion du lit de poudre et le dépôt de fil sous énergie concentrée pour deux nuances : un acier à outils et un titane.

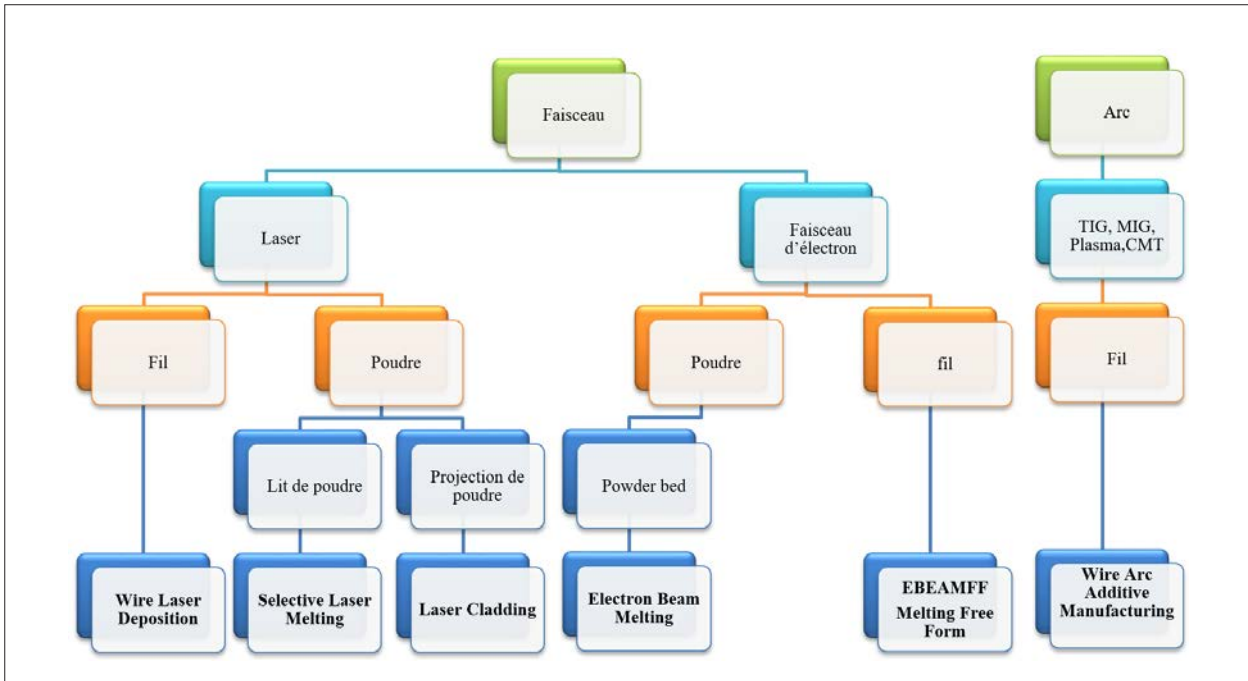


Figure 4 : Classification des technologies les plus connues en fabrication additive métallique

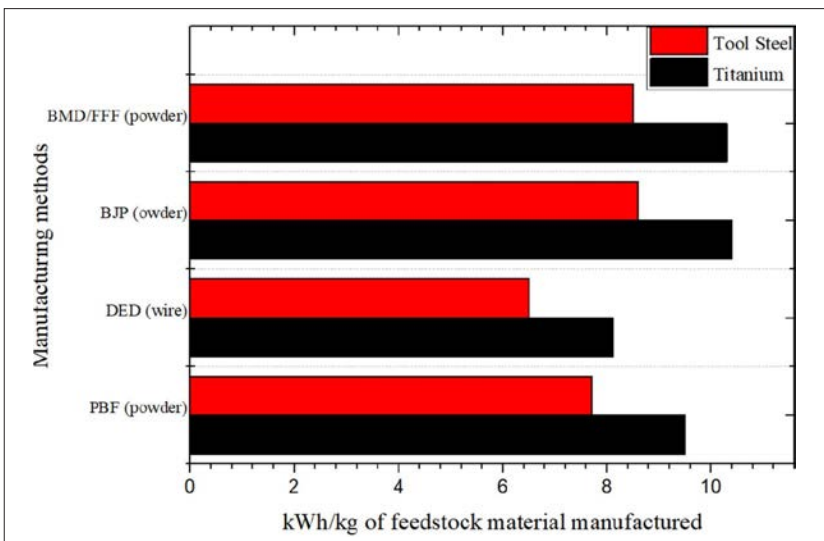


Figure 5 : Consommation d'énergie secondaire (énergie de fabrication) pour différentes technologies [17]

Sur la base de ces données, les procédés *Binder Jetting* et *Metal Fused Filament Fabrication* consomment beaucoup moins d'énergie que le *DED* (*Direct Energy Deposition*) et le *LPBF* (*Laser Powder Bed Fusion*). Il est à noter que la consommation d'énergie de *DED* fil est 4 fois moindre que la consommation énergétique en fusion sur lit de poudre ;

W de puissance pourrait consommer environ 4000 W d'énergie secondaire de fonctionnement et d'impression. Il est important de noter que dans l'ensemble, les procédés utilisant le dépôt de fil sont beaucoup plus rapides que les procédés utilisant la poudre (en projection ou en lit de poudre).

ceci est expliqué par la relation entre la vitesse de l'impression et la consommation d'énergie secondaire (de fabrication). En effet, l'épaisseur de la couche de dépôt du procédé *LPBF* varie en moyenne entre 30 à 80 micromètres, alors que l'épaisseur de dépôt de couche de *DED* peut atteindre plus de 500 micromètres. En conséquence, la vitesse d'impression du procédé fusion sur lit de poudre (*LPBF*) est bien inférieure à celle du *DED* à fil.

Même si la puissance de la source d'énergie *DED* peut être supérieure à celle du *LPBF*, la consommation d'énergie de cette dernière est très élevée dû au temps d'impression : à titre d'exemple, un laser de 500

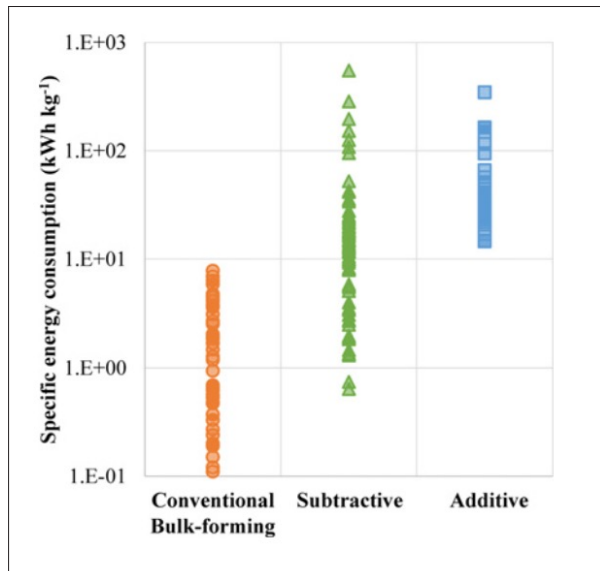


Figure 6 : Comparatif de la consommation d'énergie SEC entre l'usinage, la fabrication additive et les procédés conventionnels [18]

Cependant, si l'on compare la fabrication conventionnelle à la fabrication additive comme l'indique la figure 6, la consommation d'énergie liée au processus de fabrication additive est comparable à celle par usinage mais elle reste toujours supérieure à l'énergie de transformation des procédés conventionnels.

En somme, le bon classement de la fabrication additive ne doit pas laisser de côté la considération du bilan énergétique global, de la matière première à la pièce finale. Néanmoins, le bilan énergétique globale en termes d'énergie intrinsèque, d'énergie de transformation, d'énergie liée au post-traitement serait à étudier plus précisément afin de pouvoir le comparer à ceux des procédés à hautes températures que sont la fonderie et la forge. Dans ces deux procédés, il faut chauffer considérablement la charge jusqu'à sa fusion dans un cas et jusqu'à obtenir une déformation plastique suffisante dans l'autre. De même pour l'usinage, l'énergie utilisée pour élaborer le brut d'usinage est perdue à proportion de la quantité de copeaux produits, jusqu'à 95 % de la masse du brut dans les cas extrêmes d'usinages complexes.

La consommation d'énergie est un aspect important de l'impact environnemental de la fabrication additive métallique. La fabrication additive métallique utilise des machines qui nécessitent de l'énergie pour fonctionner et la consommation d'énergie peut varier en fonction du type de matériau utilisé, de la taille de la pièce fabriquée et du type de machine utilisée.

La fabrication additive peut offrir des avantages en termes d'économie d'énergie à long terme en permettant de produire des pièces plus légères, plus efficaces et plus durables.

Il existe plusieurs moyens pour réduire la consommation d'énergie en fabrication additive métallique :

- Utiliser des matériaux plus efficaces énergétiquement pour la fabrication ;
- Utiliser des machines plus efficaces énergétiquement ;
- Utiliser des procédés de fabrication qui nécessitent moins d'énergie pour fonctionner.
- Optimiser les paramètres de fabrication pour réduire la consommation d'énergie ;
- Utiliser des systèmes de récupération d'énergie pour réduire les coûts énergétiques.

En résumé, l'analyse du cycle de vie est une méthodologie qui prend en compte toutes les ressources entrantes et sortantes associées à un produit ou à un processus sur l'ensemble de son cycle de vie.

Les dépenses et les coûts énergétiques (l'énergie intrinsèque) peuvent être calculés à l'aide de cette méthode qui se décompose en 5 grandes familles :

1. Coûts énergétiques liés aux transformations du matériau,
2. Coûts énergétiques liés à la fabrication,
3. Coûts énergétiques liés au transport et à la distribution,
4. Coûts énergétiques liés à l'usage,
5. Coûts énergétiques liés au recyclage.

Afin d'optimiser ces coûts, il est important dans le cadre d'une démarche d'analyse de cycle de vie, de se concentrer sur ce qu'il est possible de minimiser ou de l'optimiser pour arriver à une démarche de fabrication dite « verte ».

En effet le diagramme d'Ishikawa (Figure 7) adapté permet de cerner les moyens et les actions à entreprendre afin de réduire le coût et la consommation énergétique globale. Il est important de noter que ce diagramme pourrait être plus exhaustif en termes des moyens d'optimisation de la consommation énergétique.

Étude de cas : Projet INFINITE

L'étude de cas qui suit traite principalement de l'optimisation de la consommation énergétique en usage et en recyclage et plus particulièrement de la réduction de la perte thermique dans le procédé de fonderie sous pression à travers l'optimisation du *Conformal Cooling* dans l'outillage à travers la réduction de temps de cycle et l'amélioration de la santé matière.

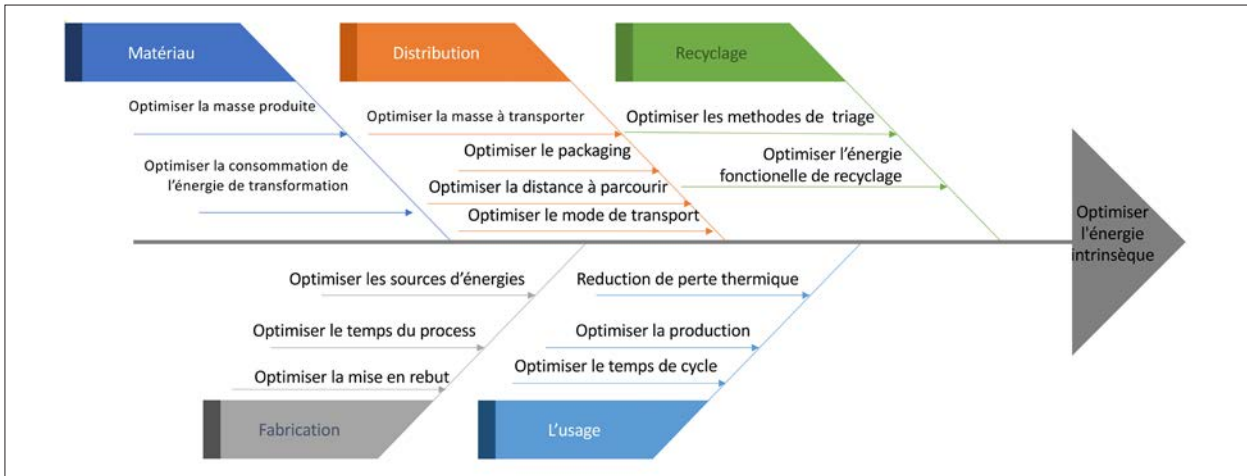


Figure 7 : Diagramme Ishikawa pour la maîtrise de l'énergie intrinsèque en fabrication additive

Les autres aspects de la consommation énergétique ne seront pas pris en compte dans cette étude, même si les deux volets les plus significatives en terme de réduction de la consommation d'énergie sont la fabrication de la matière première et le procédé de fabrication 3D.

Néanmoins, le choix a été porté sur la stratoconception associée au soudage par diffusion avec l'association de deux matériaux pour l'efficacité énergétique et l'amélioration de la santé matière, ce projet est en phase intermédiaire de développement.

Les outillages en acier permettant de réaliser des pièces injectées en polymère ou métal (alliages d'aluminium, de zinc ou de cuivre) doivent être refroidis. Dans le cas de la fonderie sous-pression, la méthode et l'efficacité du refroidissement ont un impact direct sur la qualité des pièces, la durée de vie des outillages et, dans un moindre effet, sur le temps de cycle : donc un impact sur le coût final des pièces produites. Traditionnellement, les outillages sont régulés grâce à des perçages permettant de faire circuler de l'eau dans l'outillage. La fabrication additive permet de réaliser des canaux de régulation complexes favorisant ainsi le refroidissement des pièces plus rapidement et de façon homogène.

Le projet INFINITE conduit par les équipes de CTIF¹ a pour objectif une étude de faisabilité d'une solution Multi-Matériau associée à du *Conformal Cooling* (MM-CC) pour la réalisation d'empreintes de moule en fonderie sous-pression. L'étude utilisera la simulation numérique pour tester

différentes combinaisons de matériaux et de techniques de *Conformal Cooling* afin d'améliorer à terme l'efficacité énergétique et la durée de vie de l'outillage ainsi que la qualité de la pièce produite.

Choix du couple matériau-process

L'une des phases les plus importantes de ce projet est la définition du couple matériau/process afin de déterminer la pertinence de la technologie en fonction du matériau, de la technologie et des coûts correspondants. La subtilité dans cette démarche réside dans le choix de la combinaison du couple de matériaux la plus pertinente en termes de stabilité métallurgique, de performances mécaniques et thermiques des circuits de refroidissement.

La matrice d'aide au choix est un outil d'aide à la décision qui permet d'envisager la faisabilité dans de nouveaux process, au travers d'un certain nombre de critères (matière, process, coûts ...), qui sont intégrés d'une façon matricielle en combinant les matériaux disponibles et leur *TRL* (Technology Readness Level) et positionnera ces technologies les unes par rapport aux autres (avantages, inconvénients, limites, processus associés, ...).

Plusieurs technologies et matériaux ont été comparés (Figure 8), la Fusion sur lit de poudre, la stratoconception combinée au soudage par diffusion atomique et les dépôts de poudre et de fil sous énergie concentrée. En termes de matériaux, le H11, H13, le Dievar massif et en poudre, TS700 et le W360.

¹ Le projet INFINITE bénéficie d'un abondement Institut Carnot Icéel – Prett Lorraine

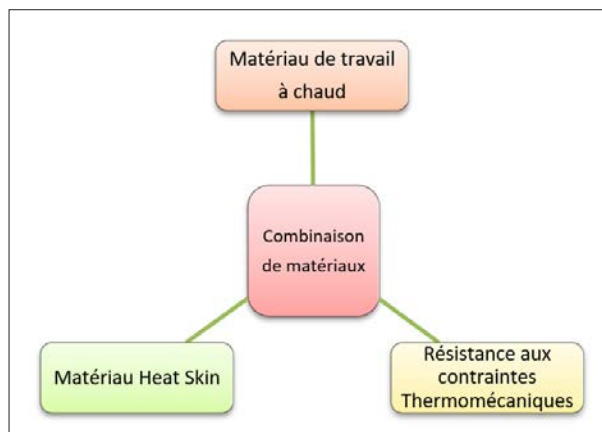


Figure 8 : Représentation du choix et de la combinaison des matériaux

Le choix s'est porté sur la combinaison du Dievar et de cuivre pur sous forme massive et sur la technologie *Metal Bonding Diffusion*, couramment appelée compaction uniaxiale à chaud, élaborée par la société HTS avec la variante *Itherm*².

Soudage par diffusion

La stratoconception et le soudage diffusion permettent tous deux de réaliser des géométries complexes et surtout avec des matériaux différents et une flexibilité de réalisation. Lorsqu'il s'agit de réalisation industrielle, notamment de réalisation de moule de fonderie avec optimisation et contrôle de flux thermique, la fabrication additive sur lit de poudre (*LPBF*) ou par dépôt sous énergie dirigée (*DED* fil et poudre) peuvent être limitées au niveau notamment des combinaisons de matériaux possibles, du design des canaux de *Conformal Cooling* et des dimensions.

Il est alors intéressant de combiner le soudage diffusion, qui est un procédé d'assemblage, avec un procédé de fabrication qui permet de diviser la pièce finale en différentes couches qui ne sont pas nécessairement uniformes en termes d'épaisseur et qui seront ensuite assemblées par la technologie du soudage par diffusion en phase solide, dans lequel les atomes de deux surfaces métalliques solides s'intercalent au fil du temps. Ceci est généralement accompli à une température élevée, à environ 75 à 90 % de la température de fusion du matériau. Le soudage par diffusion est généralement mis en œuvre en appliquant une pression élevée, associée à une température nécessairement élevée afin d'engendrer une diffusion atomique par déformation plastique.

Réalisation des démonstrateurs

Dans le cadre de ce projet CTIF, sont réalisés :

- Un premier démonstrateur industriel pour la fonderie sous pression en Dievar avec des canaux de *Conformal Cooling* réalisés en cuivre pur,
- Un deuxième démonstrateur de même configuration en Dievar uniquement, utilisé comme pièce de référence,
- Un démonstrateur académique Dievar/Cuivre afin d'évaluer la métallurgie et les performances thermiques sur un banc d'essai en coquille gravité.

En plus de la sélection du couple matériau-process, nous avons établi une démarche d'optimisation des canaux de *Conformal Cooling* en appliquant, d'une part, les règles de design pour la fabrication additive et d'autre part, les contraintes liées au procédé de la fonderie sous pression. En effet, le diamètre des canaux, leur distance par rapport à la surface et le design des canaux (forme, parcours...) conditionnent la quantité de chaleur extraite lors du cyclage thermique. Par conséquent si ce gradient thermique est mal maîtrisé, il induit une dégradation de la santé matière et de la tenue en fatigue de la pièce.

Les démonstrateurs industriels seront prochainement testés chez Sanden³, tandis que le démonstrateur académique sera analysé au CTIF dans son laboratoire de Sèvres.

Conclusion

L'évaluation de l'efficacité d'un moule de fonderie sous pression dépend de sa productivité et de la qualité de ses composants. La proximité des canaux de refroidissement détermine l'efficacité du refroidissement. Même une légère variation de la distance entre deux canaux de refroidissement peut entraîner une dissipation de chaleur inégale, entraînant une augmentation du temps de cycle, des risques de retassures, un gauchissement des pièces ou encore une durée de vie réduite de l'outil en raison des contraintes thermiques et des contraintes internes des pièces.

Le refroidissement prend une part importante dans l'optimisation du temps de cycle et surtout dans la réduction du coût énergétique associé. En effet, le *Conformal Cooling* permet de réduire le temps de cycle, jusqu'à 70 % dans certains cas et permet également de se passer du refroidissement à l'eau, en allant vers des solutions de refroidissement à l'huile et/ou utilisant un refroidissement par microjet cooling.

² Le procédé MFT (*Metal Fusion Technology*) est un procédé sous-jacent au procédé *Metal Bonding Diffusion* avec un traitement thermique spécifique optimisé (Brevet HTS_Groupe).

³ Le site industriel français de Sanden (basé entre Rennes et Saint Malo) est l'un des plus importants du Groupe SANDEN hors Japon. Constitué de trois unités de production et d'un centre technique, Sanden développe et produit des compresseurs pour les plus grands constructeurs.

Ainsi, le *Conformal Cooling* par fabrication additive peut présenter un certain nombre d'avantages pour la durabilité et pour la réduction du coût énergétique des systèmes, notamment :

- **Une réduction de la consommation d'énergie** : le *Conformal Cooling* permettant une élimination plus efficace de la chaleur, le temps de refroidissement global peut être réduit, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie du processus.
- **Une réduction de la mise en rebut** : lorsque les pièces se gauchissent ou se déforment en raison d'un refroidissement mal géré, il peut être nécessaire de les mettre au rebut, ce qui entraîne un gaspillage de matériaux et surtout augmente la consommation d'énergie intrinsèque par le recyclage. En réduisant le gauchissement, la déformation et les défauts de santé matière, le *Conformal Cooling* peut contribuer à réduire la quantité de matériaux gaspillée.
- **Une empreinte carbone plus faible** : la fabrication additive est connue pour être plus durable que les méthodes de fabrication traditionnelles, mais la consommation d'énergie pendant le processus d'impression contribue toujours à l'empreinte carbone du processus. En réduisant la consommation d'énergie, le *Conformal Cooling* peut contribuer à réduire davantage l'empreinte carbone associée à la fabrication additive.
- **Une amélioration de la qualité des pièces** : le gauchissement et la déformation peuvent conduire à l'obtention de pièces qui ne répondent pas aux spécifications souhaitées. Le *Conformal Cooling* peut contribuer à garantir que les pièces soient imprimées aux bonnes dimensions, ce qui peut améliorer la qualité globale du produit final.

Ainsi, le *Conformal Cooling* est une technique qui peut contribuer à améliorer la durabilité de la fabrication additive en réduisant la consommation d'énergie, les déchets de matériaux et l'empreinte carbone, mais aussi en améliorant la qualité du produit final.

Bibliographie

- [1] Sustainability for 3D Printing : doi.org/10.1007/978-3-030-75235-4
- [2] An appraisal on the sustainability payback of additively manufactured molds with conformal cooling : doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.064
- [3] Diffusion bonding of metal alloys in aerospace and other applications doi.org/10.1533/9780857095169.2.320

[4] Investigating the energy consumption of casting process by multiple life cycle method : https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/12876/Investigating_the_energy_consumption_of_casting_process-2014.pdf?sequence=1

[5] Soudage diffusion – Compression uniaxiale à chaud : BM7749 v1

[6] Assemblage par diffusion (soudage ou brasage) : BM7747 v1

[7] Additive manufacturing from the sustainability perspective: proposal for a self-assessment tool

[8] Strengthening the Sustainability of Additive Manufacturing through Data-Driven Approaches and Workforce Development: doi.org/10.1002/aisy.202100069

[9] Energy and material efficiency strategies enabled by metal additive manufacturing – A review for the aeronautic and aerospace sectors: doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.035

[10] A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study : doi.org/10.1007/s40684-014-0033-0

[11] Additive manufacturing for sustainability: A systematic literature review : doi.org/10.1016/j.sft.2022.100098

[12] Energy Consumption in Additive Manufacturing of Metal Parts doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.104

[13] Strengthening the Sustainability of Additive Manufacturing through Data-Driven Approaches and Workforce Development: doi.org/10.1002/aisy.202100069

[14] <https://www.rnm-metallurgie.fr/wp-content/uploads/2017-fabrication-additive-alliages-metalliques.pdf>

[15] <https://energyefficiency.ornl.gov/wp-content/uploads/2018/09/AM-Energy-Impacts-Assessment-Tool-and-Case-Studies-Guidebook-FINAL-02262015.pdf>

[16] <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/resource/chiffres-energie-consommation-industrie.xml#R1>

[17] Eco-friendly Additive manufacturing of Metals: Energy Efficiency and Life Cycle: doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.06.011

[18] A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study : doi.org/10.1007/s40684-014-0033-0



Arnaud GIBERT
Performance
Industrielle et durable
CETIM



Eric SENECHAL
Référent Technique
Efficacité Energétique
CETIM

Des bonnes pratiques réduisant la consommation énergétique dans l'industrie de la Forge

Comme dans les autres secteurs industriels, les entreprises des secteurs de la forge et de la fonderie sont confrontées depuis quelques années à une évolution rapide de leur poste de consommation énergétique. Le contexte énergétique actuel oblige les entreprises à examiner leurs consommations énergétiques avec attention et mettre en œuvre les bonnes pratiques dans ce domaine.

Le CETIM, avec le soutien de l'ADEME, a édité un ouvrage explicitant des améliorations énergétiques existantes pour l'industrie de la Mécanique. Ces améliorations d'ordre techniques, organisationnelles ou comportementales sont présentes dans tous les procédés mécaniciens consommateurs d'énergie et bien sûr au pour les procédés de forge. Concernant les procédés de fonderie, le CTIF a édité un ouvrage de référence analogue.

Avant d'envisager des projets à fort investissement, de nombreuses actions d'amélioration de l'efficacité énergétique d'un site ne demandant qu'un investissement nul ou très réduit et générant des gains financiers immédiats peuvent être mises en œuvre. Nous proposons d'en explorer particulièrement quelques-unes :

La mise en veille des machines et des utilités

Il s'agit de vérifier que les équipements le permettant sont bien à l'arrêt pendant les périodes de non-production et déconnectés des réseaux qui les alimentent (électricité, froid, air comprimé, ...). Ces consommations « de veille » peuvent engendrer des surconsommations électriques allant jusqu'à 25% de la facture annuelle.

La première étape du traitement de cette problématique réside dans l'inventaire des équipements restant en fonctionnement ou simplement alimentés pendant les heures de non-production du site. On pourra ensuite classer les équipements en fonction de la nécessité ou non de maintenir une « veille énergétique » pour garantir la production. Ces veilles peuvent être très facilement gérées soit par un renforcement des consignes d'extinction auprès du personnel soit par la pose d'horloges de programmation. On peut exploiter cette bonne pratique pour l'ensemble des procédés mécaniciens avec toutefois une technicité plus élevée sur les machines thermiques et la nécessité d'anticiper les redémarrages pour obtenir la température de consigne à la reprise d'activité.

La régulation énergétique des procédés

Il s'agit, grâce à des mesures le plus souvent techniques (régulateur PID, Variation Electronique de Vitesse, détection de présence de pièces...) mais parfois organisationnelle (campagnes de production ciblées, optimisation de la charge des équipements de production, limitation des rejets...) d'adapter le fonctionnement énergétique du procédé au volume de fabrication. Il s'agit souvent de respecter les règles de l'art comme l'adaptation de la vitesse de rotation d'un moteur en fonction de sa charge réelle. Des gains énergétiques importants sont enregistrés dans la majorité des métiers de la Mécanique et également sur les utilités en réfléchissant sur ce thème. Une réflexion sur la charge des équipements thermiques (étuves, fours), les cadences des différents cycles thermiques et les périodes de ralenti sont des mesures organisationnelles pouvant générer, après étude, des gains énergétiques significatifs sans investissements majeurs.

Le pilotage économe des fonctions accessoires

Il s'agit par exemple de la maîtrise ou la diminution de l'arrosage en usinage ou des fonctions d'homogénéisation de bains, d'extractions de polluants ou de chaleur sur les fours ou encore le refroidissement de certains équipements de production (composants, fluide de coupe, armoires d'électronique de puissance...). Des gains de 20 à 30% de la consommation des équipements de production sont possibles en n'utilisant ces fonctions qu'aux moments et niveaux nécessaires.

Mesure et suivi des consommations d'énergie

La mesure des différentes consommations des équipements est non seulement indispensable pour connaître précisément le poids énergétique des différents équipements mais elle permet également des économies directes grâce au suivi des performances des machines et la possibilité de réaction en cas de dérive. Environ 3% de la consommation mesurée peut être ainsi économisée simplement en mettant progressivement en place un plan de comptage énergétique.

Il est important qu'un référent énergie ait la charge d'assurer le suivi de ces mesures. Les gains les plus substantiels seront ensuite générés par les actions prises suite à l'ob-

servation des courbes de consommations des usages énergétiques les plus significatifs en relation avec la production

Cas spécifique des machines et procédés thermiques

Le réglage de combustion

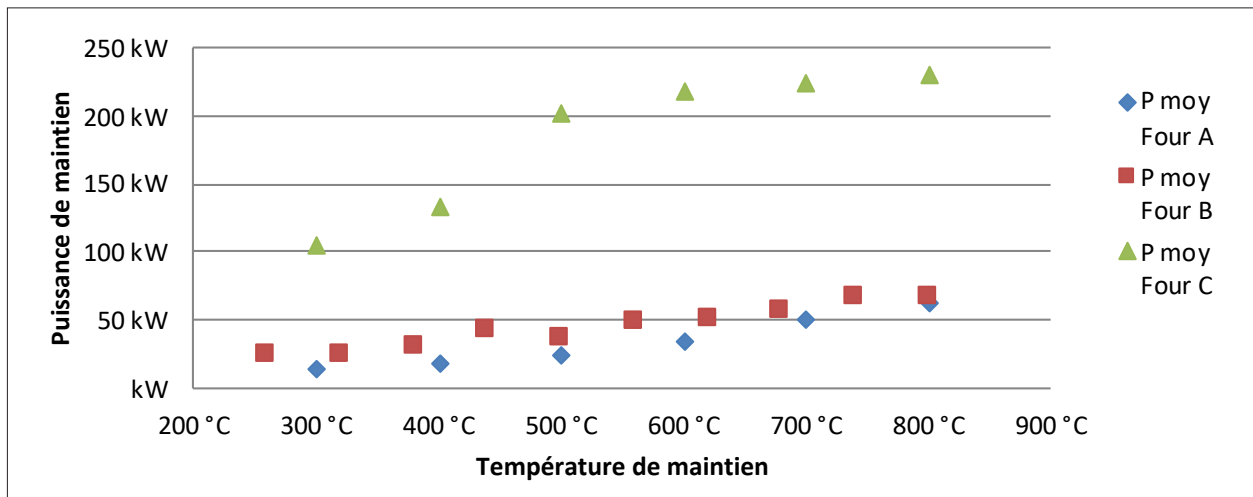
Différentes sources énergétiques et différentes méthodes peuvent être utilisées pour monter en température une charge dans un four ou une étuve. La combustion du gaz naturel ou du propane est une des techniques la plus employée pour des enceintes de chauffe de taille importante et pour les hautes températures. Pour cela, l'air mélangé au gaz combustible est prélevé soit à l'extérieur de l'atelier soit dans l'atelier. La température et l'humidité de cet air sont très variables notamment en fonction de la saisonnalité. Il est donc très important de bien veiller au bon réglage de l'excès d'air au niveau du brûleur pour obtenir un rendement maximum lors de la combustion. En effet, un excès d'air trop important va refroidir les gaz de combustion (cet excès ne participera pas à la combustion) et diminuer le rendement du brûleur. Il est généralement admis que la zone de combustion optimale pour le gaz naturel est de 5 à 10 %. L'intervention d'un spécialiste peut être nécessaire si la compétence n'est pas maîtrisée par l'entreprise.

Le balayage de sécurité

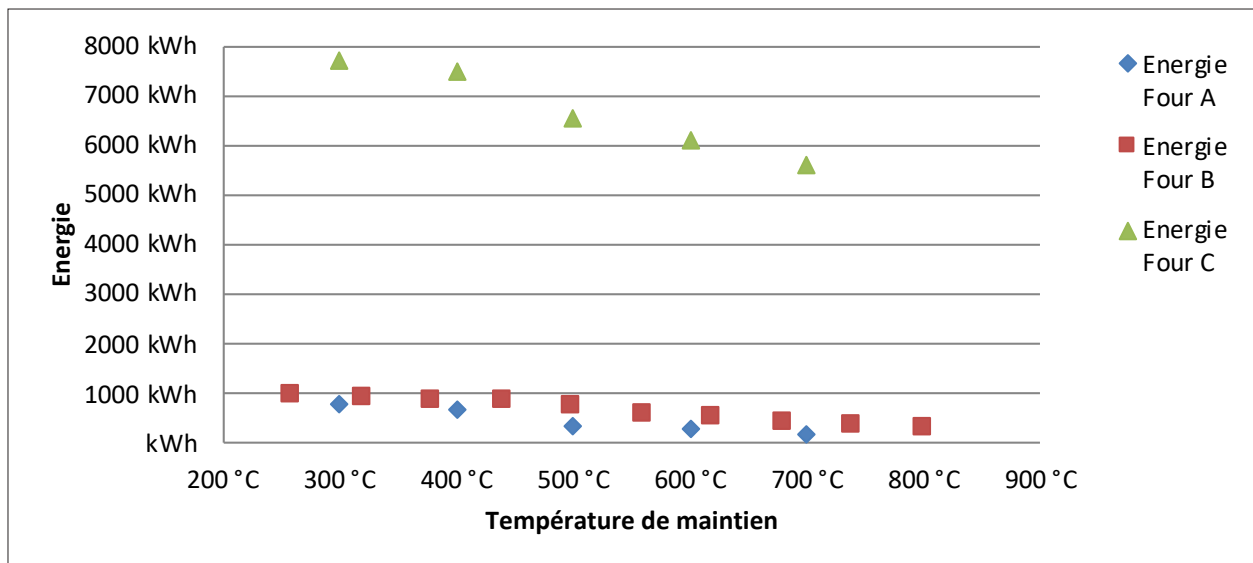
De même, le réglage du balayage de sécurité dans les enceintes munies de brûleurs gaz est essentiel. Il s'agit, pour éviter tout risque d'explosion par accumulation de gaz naturel non brûlé, de souffler une grande quantité d'air neuf avant l'allumage des brûleurs. Un balayage de sécurité trop prolongé refroidit fortement les parois et l'atmosphère du four ce qui provoquera une surconsommation énergétique. Ce balayage, indispensable pour la sécurité, doit être dimensionné au plus juste en fonction de l'état de l'art.

La gestion des températures de maintien

Le choix de la température de maintien des fours ou étuves pendant les arrêts de production est une source importante d'économies mais qui doit être techniquement étudiée. Cette étude nécessite l'enregistrement de la température et de la consommation énergétique lors d'un refroidissement complet de four puis sa remise en température de production. Les graphiques de la page suivante montrent l'importance d'une analyse spécifique à chaque four.



Puissance en fonction de la température de maintien



Energie pour remonter à la température de production depuis une température de maintien

Ces données et les informations concernant les temps de refroidissement et de chauffe permettent de définir une température de maintien optimale et l'heure de remise en chauffe du four. Ce pilotage peut permettre des économies très importantes d'énergie thermique mais dépend de paramètres nombreux dont l'isolation et l'inertie des parois ainsi que le niveau des températures de consignes. Lors des études menées par le Cetim (avant l'envolée des coûts énergétiques) les gains engendrés étaient de l'ordre de 250 à 350 € de gain pour une baisse de la température de maintien pour un weekend.

L'isolation

On veillera régulièrement à un contrôle de l'isolation thermique des fours de traitement en particulier si ceux-ci sont à haute température. La dégradation de l'isolation au point de vue mécanique ou chimique peut générer des fuites thermiques importantes souvent localisées sur le toit du four. De même l'isolation des ponts thermiques de la structure lors de la construction ou de la rénovation de l'équipement sont des points d'actions importants. Une campagne annuelle de détection de fuite thermique

sur les parois du four à l'aide d'une caméra thermique (possibilité de location) peut permettre de trouver et de supprimer ces zones de pertes thermiques sur les parois. La mise en place d'un suivi du refroidissement passif du four permet aussi de suivre globalement la dégradation de l'isolant. Un point de référence doit être fait lors de sa rénovation.

La gestion de l'aéraulique

De mauvaises conditions aérauliques (courant d'air) peuvent perturber un équipement thermique comme un four et provoquer une surconsommation importante d'énergie. Les entrées et sorties des dispositifs thermiques à passage sont d'ailleurs des points où des gaspillages énergétiques peuvent être constatés et où des réponses technologiques existent : rideaux d'air, silhouette adaptatives,... Pour les fours à charges, la gestion des ouvertures de portes et la régulation du tirage sont primordiaux.

Le gain sur cet aspect sera double : thermique car la quantité d'air neuf à réchauffer sera moindre et électrique car la consommation des ventilateurs sera diminuée.

La récupération d'énergie thermique

Cette action nécessitant un investissement a été étudié dès 2012 par le Cetim sur des fours de traitement thermique et avait à ce moment-là un temps de retour sur investissement d'environ 3ans. La récupération de chaleur peut se faire via un échangeur air/air à haute température par exemple pour préchauffer l'air comburant des brûleurs, avec un échangeur air/eau pour préchauffer ou chauffer de l'eau de process ou sanitaire. Cette chaleur peut être utilisée pour de nombreuses applications : préchauffage de l'air des brûleurs, préchauffage des pièces, apport de chaleur dans un autre équipement de production thermique ou pour le chauffage des locaux. La récupération de chaleur se fait en général sur les fumées du four ou une sortie d'atmosphère. Le préchauffage de l'air par récupération sur les fumées peut générer des gains en combustible de 15 à 25%. Pour les récupérations basse température on peut également utiliser les Pompes à Chaleur qui permettent maintenant en 1 seul équipement

des niveaux de température d'eau compatibles avec les process industriels (environ 100°C) grâce aux PAC Haute Température.

Les utilités et le conditionnement d'ambiance

Pour le chauffage et la climatisation, le pilotage des températures de confort ou de ralenti en fonction de l'occupation est une bonne pratique très efficace. De même que la maîtrise du renouvellement d'air des locaux ou le choix des appareils de chauffage les plus adaptés (air chaud ou rayonnement).

Dans le domaine de la production et de la distribution de l'air comprimé, la recherche et la réparation régulière des fuites, le réglage de la pression de service au plus bas possible et l'optimisation de l'engagement du ou des compresseurs sont parmi les bonnes pratiques les plus énergétiquement rentables.

Pour l'éclairage des locaux, des améliorations énergétiques existent également allant de la simple gestion des allumages en fonction de la présence du personnel à la substitution des anciens luminaires par des équipements plus efficaces, à LED par exemple.

Les aides

Une fois les actions comportementales, de réglage et d'organisation mise en œuvre des actions des accompagnements peuvent être proposés par les différentes régions, généralement en co-financement avec l'ADEME pour les actions sur l'énergie.

Pour les investissements, les certificats d'économie d'énergie (CEE) doivent être sollicités sous la forme d'action standardisée ou spécifique en fonction du projet.

Pour aller plus loin le site de <https://les-aides.fr/> permet d'identifier les aides mobilisables pour votre projet dans votre environnement. Les délégation régionales du Cetim sauront identifier avec vous les aides mobilisables et le service SQR@cetim.fr vous oriente toujours vers les interlocuteurs a même de répondre a vos besoins.