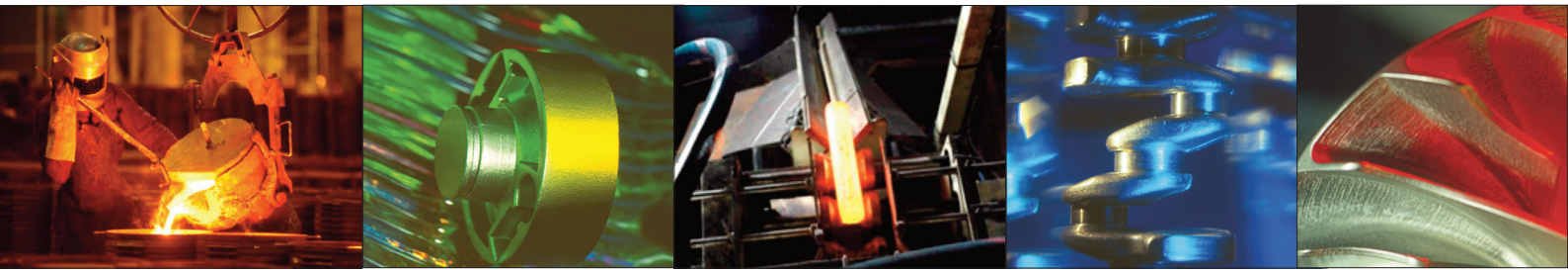
GUIDE

DE BONNES PRATIQUES ÉNERGÉTIQUES ET DE DÉCARBONATION EN FORGE ET FONDERIE

Faire des économies et décarboner
à faible coût d'investissement



Projet porté par

INTRODUCTION

Depuis la fin des tarifs réglementés, les prix du gaz et de l'électricité sont soumis aux variations des marchés. La forte reprise économique mondiale post-COVID et le conflit en Ukraine ont entraîné des augmentations extrêmement importantes des prix des énergies.
Face à ces conditions nouvelles, les entreprises ont désormais mis au premier plan la maîtrise de leurs coûts énergétiques, et donc de leurs consommations.

Dans les forges et les fonderies, l'énergie, principalement utilisée pour chauffer le métal, est une composante importante des coûts de production et de la compétitivité.
Aussi, la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE et le CETIM se sont associés pour produire ce guide de bonnes pratiques en matière d'efficacité énergétique sur les usages thermiques dans la profession. Ces bonnes pratiques d'optimisation et de réduction des consommations d'énergie constituent le socle de toute démarche de décarbonation.
L'objectif de ce guide est de mettre en avant des actions simples, à faible coût d'investissement et avec un temps de retour sur investissement rapide. Il s'appuie sur l'expertise technique du CETIAT qui en est le rédacteur.

Le guide est composé de 18 fiches-actions réparties sous deux thématiques :

1. Actions techniques sur les fours et outils de chauffe : 11 actions
2. Actions organisationnelles ou de conception : 7 actions

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

Elles sont structurées de la manière suivante :

- Contexte et enjeux : une brève présentation des objectifs visés dans la fiche,
- Avantages de l'action
- 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 publics d'aide au financement, 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

SOMMAIRE

Actions techniques sur les fours et outils de chauffe :

1. Fermeture des portes de fours
2. Vérification de l'étanchéité des portes de fours
3. Vérification et renforcement de l'isolation des fours
4. Couverture des canaux de circulation du métal en fusion pour limiter les pertes
5. Utilisation/installation de couvercles sur les enceintes chauffées (fours, poches, …)
6. Maintien d'une pression appropriée dans le four pour éviter les fuites aérauliques
7. Réglages de la combustion à la stœchiométrie pour les fours à gaz
8. Vérification et calibrage de l'instrumentation des équipements de chauffe
9. Optimisation des températures de consigne
10. Entretien des échangeurs de chaleur pour limiter l'encrassement
11. Adéquation entre le diamètre des lopins et la plage de l'inducteur

Mesures organisationnelles ou de conception :

12. Installation de sous-compteurs d'énergie sur les fours
13. Mise en place d'indicateurs de performance énergétique
14. Analyse du talon de consommation
15. Optimisation énergétique du cycle de production via les facteurs organisationnels et humains
16. Organisation des équipes de production pour travailler pendant les heures creuses
17. Gestion des arrêts et démarrages des équipements thermiques
18. Utilisation de la simulation numérique pour l'optimisation de la mise au mille.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°1

FERMETURE DES PORTES DE FOURS

Contexte et enjeux

Les déperditions thermiques d'un four sont les plus importantes lorsque sa porte est ouverte. La laisser ouverte trop longtemps entraîne une surconsommation significative.
Il existe trois modes de fonctionnement de four lorsque la porte est ouverte :

- **Brûleur s'éteignant à l'ouverture**
L'air chaud s'échappe du four et la température diminue rapidement. L'essentiel de la chaleur est emmagasiné dans les réfractaires à l'intérieur du four, elle rayonne dans l'atelier par l'ouverture de la porte. Il faut alors relancer un cycle de chauffe. Le risque est que les pièces restantes dans le four refroidissent.

- **Brûleur à puissance maximale pendant l'ouverture**
À l'ouverture, les brûleurs fonctionnent au maximum de leur capacité pour atténuer le refroidissement du four. Cette configuration entraîne une surconsommation.

- **Activation d'un mur de flammes**
Des brûleurs situés à la sortie du four s'activent lorsque la porte est ouverte afin de maintenir la température dans l'enceinte et d'éviter un refroidissement des pièces. Cette configuration entraîne le plus de surconsommation.

crédit photo : iStock

Les avantages des fermetures de porte contrôlées

- Meilleur maintien des pièces en température, meilleure remontée en température après rechargement
- Diminution du coût de la non-qualité, notamment pour certains produits délicats ne supportant pas les baisses intempestives de température (traitement thermique)
- Amélioration du confort et de la sécurité du personnel

Pour passer à l'action

- Toute solution réduisant le temps d'ouverture de porte
- Automate de fermeture automatique
- Mise en place d'un signal sonore si le four reste trop longtemps ouvert
- Télécommande sur le chariot de manutention des pièces
- Sensibilisation des opérateurs de fours à la bonne fermeture des portes
- Outil de surveillance de la bonne fermeture des portes

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

FERMETURE DES PORTES DE FOURS

Intérêt technico-économique

La réduction des pertes thermiques est considérable lorsque la porte est fermée.

Four à **1 000°C** avec une porte de **12 m²** (4 m de large et 3 m de haut)	Consommation porte ouverte	Consommation porte fermée
	1 800 kW (équivalent à la somme des puissances des brûleurs)	**5 kW**

Four à 1 000°C avec une porte de 12 m², la **réduction de 5 min par cycle** d'ouverture/fermeture de porte (10 fois/j sur 240 j = 200 h)	Gain énergétique	Économies	Émissions évitées
	362 MWh/an	10k€/an[1]	86 tCO_2/an[2]

[1] Sur la base d'un prix du gaz naturel à 31,3 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)
[2] Facteur d'émission : 239 g/kWh PCI (Source : ADEME)

Mise en œuvre de l'action :

TRI <1an

Niveau de gain **€€**€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

Retour d'expérience

Fonderie Saint Jean Industries, Belleville-en-Beaujolais (69) Fonderie d'aluminium principalement destinée au marché de l'automobile.

"Nous avons actuellement un four tunnel de préchauffe pour la forge fonctionnant à 540°C en production et à 200°C le week-end lorsqu'il est en réduit.

En production, un tapis fait entrer les pièces à chauffer toutes les 10 à 35 secondes. Les portes en entrée et sortie sont actuellement constamment ouvertes.

Nous avons entrepris des tests les week-ends, lorsque le four fonctionne en réduit, pour fermer manuellement la porte dont la manœuvrabilité est actuellement complexe. Le gain estimé est de 4 MWh par week-end. La démarche pourrait être étendue en semaine de production avec un automate qui détecte les pièces entrantes. Cette action est menée dans le cadre de l'ISO 50 001.

Malgré un investissement assez élevé (environ 35 k€ de vérins et d'automatisme), le TRI pourrait avoisiner les 3 ans."

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°2

VÉRIFICATION DE L'ÉTANCHÉITÉ DES PORTES DE FOURS

Contexte et enjeux

L'étanchéité des portes de fours (et du four dans son ensemble) est fondamentale pour assurer la meilleure performance énergétique possible. Cette action est un préalable aux autres actions d'efficacité énergétique constituant ce recueil.
À cause de chocs mécaniques et thermiques, les réfractaires peuvent se dégrader. Il peut en résulter des brèches au niveau de la porte qui laissent sortir l'air chaud ou bien entrer l'air froid. Parfois, le système de fermeture de la porte est défaillant et ne permet plus d'en assurer l'étanchéité.
Il est important de traiter les défauts d'étanchéité des portes de four au plus tôt, car une brèche va s'agrandir du fait de l'érosion des couches de réfractaires composant la paroi du four.

crédit photo : iStock

Les avantages de l'étanchéité des portes de four

- Réduction des pertes thermiques (réduction des entrées d'air froid parasites et des pertes par rayonnement)

- Meilleure homogénéité thermique (meilleure maîtrise du delta de température interne au four)

- Meilleure maîtrise de la pression dans le four notamment à basse puissance des brûleurs. Permet une meilleure maîtrise de la quantité d'air comburant apportée aux brûleurs, en particulier pour les brûleurs à récupération

- Évite la déformation des enveloppes des fours

- Meilleur captage de la chaleur fatale dans le cas d'un projet de récupération en évitant une perte de chaleur non maîtrisée

- Réduction de la migration de polluants du four vers l'atelier, dans le cas de fours sous pression

- Amélioration du confort thermique dans l'atelier, notamment en été

Pour passer à l'action

- La surveillance régulière des ouvertures à l'aide d'une caméra infrarouge permet d'identifier les zones qui présentent une température inadéquate :
  - ⇨ Trop froide = entrée d'air
  - ⇨ Trop chaude = sortie d'air
- Pour les fours à combustion, le taux d'oxygène dans les fumées est un bon indicateur de l'étanchéité globale du four. Son suivi permet de détecter les dérives au cours du temps.

- Des travaux de fumisterie permettent de réparer les réfractaires, les joints de la porte, voire le système de fermeture de la porte.

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

Intérêt technico-économique

Cas d'un four fonctionnant 6 000 h/an, avec une surpression de 15 Pa	Température (°C)	Surface de fuite (cm^2)	Pertes instantanées (kW)	Sur-consommation (MWh/an)	Surcoût[1] (k€/an)	Émissions supplémentaires (tCO_2/an)[2]
	1 200	1 000	318	1 906	57	456
	1 000	500	140	852	25	204

[1] Sur la base d'un prix du gaz naturel à 31,3 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)
[2] Facteur d'émission : 239 g/kWh PCI (Source : ADEME)

Mise en œuvre de l'action :

TRI < 1 an

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

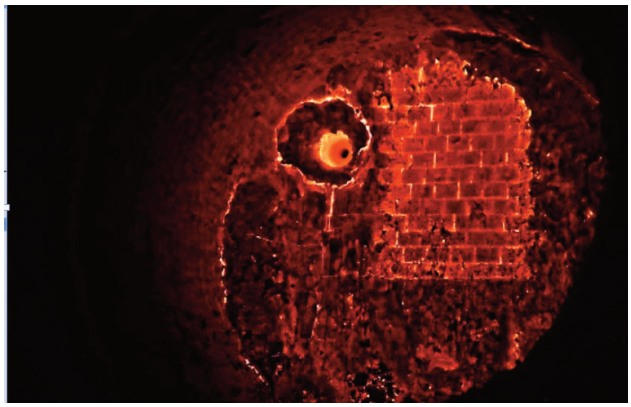
Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°3

VÉRIFICATION ET RENFORCEMENT DE L'ISOLATION DES FOURS

Contexte et enjeux

L'enveloppe d'un four est constituée de plusieurs couches de matériaux isolants et réfractaires. Elles ont pour but de limiter les déperditions thermiques et de protéger l'espace environnant et le personnel d'exploitation.
Cette isolation peut se dégrader au cours du temps. L'enveloppe métallique du four chauffe alors et se dilate, ce qui fait "vieillir" la structure du four. L'une des causes de cette dégradation est l'enchaînement des cycles de fonctionnement du four (montées et descentes en température). Les déperditions thermiques peuvent aussi être dues à une isolation moins performante que les standards actuels, le four ayant été conçu et construit à une époque où les prix des énergies étaient plus faibles.

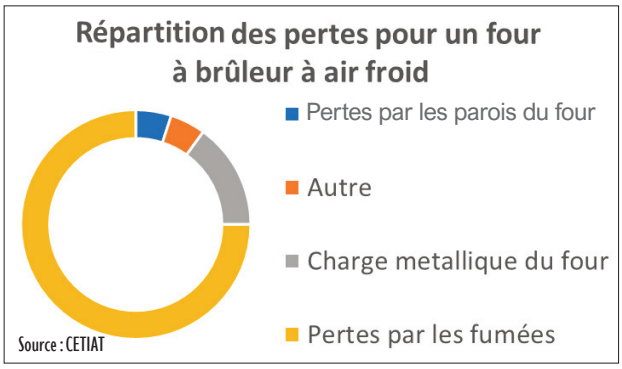


crédit photo : Getty Images

Les avantages du renforcement de l'isolation du four

● Un four correctement isolé a une température de paroi de l'ordre de 50°C, cela correspond alors en général à 5 % des pertes thermiques totales. En comparaison, un four avec des défauts d'isolation peut présenter des déperditions aux parois allant jusqu'à 20% des pertes thermiques totales. Une bonne isolation réduit donc la consommation énergétique du four.

● De plus, un four bien isolé thermiquement réduit le risque de brûlure par contact des parois extérieures.



Pour passer à l'action

• Surveillance des points chauds sur l'enveloppe métallique du four
Le non-respect des rampes de montée en température ou le vieillissement du four peuvent induire une dégradation des réfractaires et créer des points chauds. Ces zones s'agrandissent avec le temps.

Action n°1 : Sensibiliser le personnel concernant le respect des rampes de montée en température prescrites par le fabricant. Des phases de montée en température plus longues préservent les réfractaires et permettent d'espacer les réfections de four.

Action n°2 : Surveiller l'apparition de points chauds à l'aide d'une caméra thermique. Un contrôle régulier permet d'anticiper et de planifier les travaux, et d'agir avant que les dégâts ne deviennent trop importants. Les travaux peuvent être lourds et longs à mettre en œuvre : jusqu'à plusieurs jours pour descendre le four en température, et pour que les réfractaires sèchent ou frittent après réparation.

• Travail sur l'émissivité du four
Si la température de surface du four est élevée, les échanges radiatifs ne deviennent plus négligeables. Une surface réfléchissante diminue ces échanges et par conséquent les déperditions du four. L'aluminisation de la surface extérieure du four permet de limiter ces pertes thermiques par radiation.

Actions : Si le four n'est pas aluminisé, aluminiser le four. Prix : de l'ordre de 50€/m^2. Si le four est aluminisé, nettoyer les surfaces intérieures du four régulièrement, la poussière annule l'effet bénéfique de l'aluminisation.

Pour aller plus loin : une réfection de l'isolation du four peut être entreprise en vue d'améliorer ses performances mais c'est un investissement conséquent. Une isolation plus épaisse peut avoir pour conséquence une diminution du volume disponible du four. Pour éviter tout problème de surchauffe par changement de l'équilibre thermique du four, tous travaux doivent **être validés par une société de fumisterie ou par le constructeur.**

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

VÉRIFICATION ET RENFORCEMENT DE L'ISOLATION DES FOURS

Intérêt technico-économique

Four de 8 000 kW mal isolé fonctionnant à 800°C (10% de déperditions au lieu de 5% avec une isolation correcte)	Pertes instantanées	Sur-consommation	Surcoût[1]	Émissions supplémentaires
Utilisation : 7 500 h/an	95 kW	715 MWh/an	23 k€/an	171 tCO_2/an[2]

[1] Sur la base d'un prix du gaz naturel à 31,3 €/MWh (Source Enerdata, année 2019).
[2] Facteur d'émission : 239 g/kWh PCI (Source : ADEME)

Mise en œuvre des actions d'aluminisation et de surveillance des points chauds :

TRI 1 à 3 ans

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Fiche CEE n° IND-UT-131 "Isolation thermique des parois planes ou cylindriques sur des installations industrielles"

Retour d'expérience

Fonderie Saint Jean Industries, Belleville-en-Beaujolais (69)
Fonderie d'aluminium principalement pour le marché de l'automobile.

"Nous avons pour habitude lors de l'arrêt annuel d'inspecter l'état de tous nos fours. Le contrôle se fait visuellement pour vérifier l'état des réfractaires, mais aussi à l'aide d'une caméra thermique pour identifier d'éventuelles hétérogénéités de température ou l'apparition de points chauds.
Si des travaux de réfection doivent être entrepris, nous sous-traitons la tâche au constructeur du four qui propose cette prestation.
Il est difficile d'estimer les gains engendrés par cette action de maintenance puisqu'il s'agit plutôt de maintenir les performances du four en empêchant son vieillissement. Cette maintenance régulière permet ainsi d'éviter des réparations majeures, globalement bien plus coûteuses."

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°4

COUVERTURE DES CANAUX DE CIRCULATION DU MÉTAL EN FUSION POUR LIMITER LES PERTES

Contexte et enjeux

Les canaux de coulée servent à transporter le métal liquide du four vers le moule. Sur de nombreux sites de production, ils sont ouverts pour contrôler visuellement la coulée.

Compte tenu du niveau de température, les pertes par rayonnement sur un canal ouvert sont importantes. Pour contrer ces pertes en ligne, le métal est surchauffé pour arriver à destination à la bonne température, ce qui entraîne des surconsommations.

Couvrir ces canaux permet de réduire les pertes thermiques du métal liquide et donc le besoin de surchauffe.

Ces pertes varient grandement en fonction de la température de fusion et donc en fonction de chaque métal ou alliage employé. Elles sont bien sûr également proportionnelles à la longueur des canaux.

crédit photo : Alamy

Les avantages de la couverture des canaux de coulée

On constate de manière empirique qu'un chenal non couvert transportant de l'acier entraîne une baisse de température de 6°C par mètre. Une couverture de canal peut limiter la déperdition à 3°C par mètre et donc limiter la surchauffe nécessaire du métal.

Concrètement, les gains en jeu sont peu élevés par rapport aux consommations globales, mais la couverture des canaux est une action très simple à mettre en œuvre et participe à l'efficacité énergétique du process dans son ensemble.

Pour passer à l'action

- Couverture du chenal par des blocs réfractaires facilement démontables
- Installation de couvertures démontables

Point de vigilance : Le besoin des opérateurs de "voir" la coulée pour s'assurer que tout se passe bien n'est pas à négliger. Il peut donc être intéressant de conserver des espaces de visualisation ou de placer des couvertures ouvrables si besoin.

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

SUITE

n°4

COUVERTURE DES CANAUX DE CIRCULATION DU MÉTAL EN FUSION POUR LIMITER LES PERTES

Intérêt technico-économique

Valeurs indicatives de pertes par mètre linéaire de métal découvert, calculées sur un temps de fonctionnement de 2 000 h. Des variations importantes existent en fonction des installations.

Métal	Température du métal liquide (°C)	Pertes par convection (kW)	Pertes par rayonnement (kW)	TOTAL (kW)	Pertes annuelles (MWh)	Surcoût annuel par mètre linéaire[1] (€)
Acier	1 400	2	41	43	86	2 700
Cuivre	1 185	8	13	21	42	1 300
Laiton	1 000	12	18	30	59	1 800
Aluminium	760	6	3	9	16	500

[1] Sur la base d'un prix de l'électricité de 96 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)

Mise en œuvre de l'action :

TRI < 1 an si installation basique. Entre 1 et 3 ans si nécessite des travaux complexes du fait d'un manque d'accessibilité par exemple

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°5

UTILISATION/INSTALLATION DE COUVERCLES SUR LES ENCEINTES CHAUFFÉES (FOURS, POCHES, …)

Contexte et enjeux

En dehors des phases de chargement et de décrassage, l'installation et l'utilisation de couvercles sur les fours à creuset ou sur les poches de transport permet de réduire les pertes thermiques.
Le métal liquide ayant une température élevée, les pertes thermiques se font majoritairement par rayonnement, exception faite de l'aluminium, qui fond à plus basse température et pour lequel les pertes par convection sont majoritaires.
Plus le métal est chaud, plus les pertes thermiques par rayonnement sont importantes, puisque celles-ci sont proportionnelles à la température du métal à la puissance 4. Cependant, d'autres paramètres sont à prendre en compte, comme les caractéristiques du métal ainsi que ceux du contenant (émissivité du métal, géométrie et remplissage du contenant, présence de crasse, etc.).

crédit photo : iStock

Les avantages de la couverture des fours à creuset et des poches

- Économies d'énergie induites par la réduction de la surchauffe nécessaire
- Amélioration du confort et de la sécurité du personnel : moins de rayonnement et de risques de projections

Pour passer à l'action

- Installation de couvercles sur les poches de transport et les fours à creuset
- Si le couvercle est déjà présent, sensibilisation du personnel à son utilisation
- Mise en place de couvercles à ouverture et fermeture automatiques

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

SUITE

n°5

UTILISATION/INSTALLATION DE COUVERCLES SUR LES ENCEINTES CHAUFFÉES (FOURS, POCHES, …)

Intérêt technico-économique

● Dans le cas de l'acier, le couvercle d'un four à induction maintenu ouvert pendant 20 minutes entraîne une surconsommation de 10 kWh/t d'acier fondu. Ci-dessous, l'estimation des consommations induites par la présence ou non d'une couverture sur du métal en fusion (kWh/min).

		Couvercle ouvert ou sans couverture (kWh/min)			Couvercle fermé (kWh/min)
	Température de la fonte liquide	**1 300°C**	**1 400°C**	**1 500°C**	**1 300°C à 1 500°C**
Diamètre du four ou de la poche	**0,8 m**	1,4	1,8	2,3	0,2
	1 m	2,2	2,8	3,6	0,3
	1,2 m	3,2	4,1	5,1	0,4

Données indicatives, des variations importantes existent en fonction des installations
(Source : Maîtrise de l'Énergie dans l'Industrie de la Fonderie, CTIF-CETIM)

Les économies potentielles dépendent du cycle de production de l'usine et surtout de la fréquence d'ouverture du four ou d'utilisation de la poche. Ces économies sont de l'ordre de plusieurs centaines d'euros par an pour un four de taille moyenne (4 à 10 tonnes).

Mise en œuvre de l'action :

TRI
Immédiat si couvercle déjà en place,
< 3 ans si automatisation du couvercle

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°6

MAINTIEN D'UNE PRESSION APPROPRIÉE DANS LE FOUR POUR ÉVITER LES FUITES AÉRAULIQUES

Contexte et enjeux

Le maintien d'une pression appropriée dans le four est important à la fois pour une bonne efficacité énergétique et pour la sécurité du personnel.
Le tirage à la cheminée est un phénomène naturel présent dans les fours. Ce phénomène augmente avec la température de fonctionnement et les défauts d'étanchéité du four. Il a tendance à mettre le four en dépression, ce qui augmente les pertes thermiques et l'hétérogénéité des températures internes, et peut conduire à des défauts de qualité produit.
Pour les fours avec des fumées propres, la mise en surpression (légère) du four est souhaitable pour favoriser l'homogénéité des températures internes. L'apport de gaz par les brûleurs permet un maintien d'une pression positive dans le four. En revanche, si elle devient trop importante, cela peut provoquer des sorties de fumées non contrôlées.
Pour les fours à pollution spécifique, il est parfois nécessaire que ceux-ci soient en légère dépression afin de garantir la santé des personnes. La mise en œuvre de variateurs de vitesse sur les ventilateurs permet d'ajuster le débit de fumées extraites et de limiter la consommation électrique des ventilateurs.

Les avantages d'une pression de four contrôlée

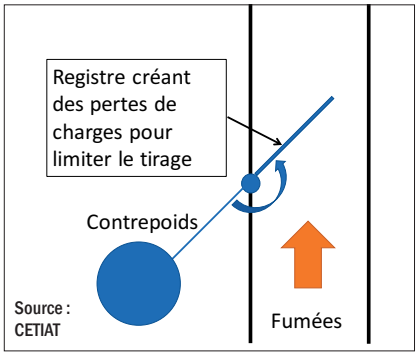
Si le four avant réglage était en dépression, la remise en légère surpression permet :
- D'améliorer la qualité des pièces par l'amélioration de l'homogénéité de la température dans le four
- De réaliser des économies d'énergie (diminution des pertes thermiques).

Si le four avant réglage était en trop grande surpression, la remise en légère surpression permet :
- De réaliser des économies d'énergie (diminution des pertes thermiques par fuites)
- De protéger la santé des opérateurs : limitation des fuites de produits de combustion (CO, NO_x, poussières et autres polluants) dans l'atelier

Pour passer à l'action

Pour assurer une légère surpression dans le four, il faut que celui-ci soit préalablement le plus étanche possible (cf. fiche 2, étanchéité des portes de four).
Pour les fours automatiques et fours tunnels, à chargement régulier, les sas d'entrée/sortie doivent être aménagés de façon à limiter les entrées d'air (doubles portes, allongement des sas…).
La cheminée doit constituer la seule issue pour les fumées. Pour pouvoir contrôler la pression dans un four, il faut pouvoir réduire le débit de l'extraction lorsque les brûleurs ralentissent ou s'arrêtent. Généralement l'installation d'un clapet de tirage permet cette régulation : Le clapet prend plusieurs formes (guillotine, asservi par un moteur, à contrepoids…) et sert à créer de la perte de charge. S'il n'est pas présent, en installer un. S'il est présent, s'assurer de son bon réglage.
Point de vigilance : Le clapet de tirage peut se dérégler (usure du réfractaire du clapet) et se retrouver en position trop ouverte

La mesure de la pression, par sonde, dans le four permet de s'assurer que ces équipements fonctionnent bien.
Une version plus élaborée du clapet de tirage consiste à avoir un organe de régulation motorisé (registre ou ventilateur d'introduction d'air frais dans la cheminée) commandé par la(les) sonde(s) de pression présente(s) dans le four. Ce dispositif a l'avantage de pouvoir adapter sa régulation et d'intégrer des fonctions supplémentaires comme l'anticipation d'une ouverture de porte.



Contrôle pression interne des fours

Point de vigilance N°1 : La sonde doit être positionnée judicieusement dans le four.
Une seule en haut du four risque de donner une pression élevée alors que le bas du four est en dépression. Idéalement, en placer une en haut et une en bas.

Point de vigilance N°2 : La pose d'un équipement de mesure implique son entretien régulier (1 fois par an minimum dans le cas d'une sonde de pression). Une sonde déréglée ou bouchée risque d'aggraver les déperditions (voir fiche N°8, vérification et calibrage des instruments de chauffe) en plus de gêner le pilotage du four.

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

SUITE

n°6 MAINTIEN D'UNE PRESSION APPROPRIÉE DANS LE FOUR POUR ÉVITER LES FUITES AÉRAULIQUES

Intérêt technico-économique

Four de 8 MW fonctionnant 6 000 h/an en surpression de 15 Pa avec une surface de fuite de 0,05 m² en pied de porte (2,5 m x 2 cm)	Surconsommation (MWh/an)	Sutcoût (k€)[1]	Émissions additionnelles de CO_2 (tonnes/an)[2]
	659	21	157

[1] Sur la base d'un prix du gaz naturel à 31,3 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)
[2] Facteur d'émission : 239 g/kWh PCI (Source : ADEME)

Mise en œuvre de l'action :

TRI <1an

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

Retour d'expérience

Framatome, Le Creusot (71) Forge d'équipements lourds essentiellement pour l'industrie nucléaire.

"Dans notre secteur d'activité, la production est soumise à des contrôles qualité particulièrement stricts, la mesure de pression équipe donc tous les fours du site pour s'assurer du respect des valeurs cibles. Une large majorité (80%) du parc est équipé d'organes de régulation de pression (registre) asservis à des sondes de pression.
Cette mesure a été mise en œuvre en premier lieu dans le cadre d'une amélioration de la maitrise process / qualité, mais son application a également entrainé des gains énergétiques que nous n'avons pas encore pu quantifier précisément.
En complément, la mesure de la pression couplée avec la régulation fine de pression avec un registre ont permis une meilleure homogénéité de température des fours ainsi équipés.
Le site a établi des valeurs de surpression pour chaque four en fonction de ses spécificités, de 6 Pa à 50 Pa.
Les investissements nécessaires à cette action ont consisté en l'installation de registres et de vérins et de systèmes de régulation."

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°7

RÉGLAGES DE LA COMBUSTION À LA STŒCHIOMÉTRIE POUR LES FOURS À GAZ

Contexte et enjeux

Le rendement de la combustion dépend à la fois de l'écart de température entre l'air entrant (air comburant) et l'air sortant (fumées) et de l'excès d'air dans les fumées (quand la quantité de comburant est supérieure à la quantité nécessaire pour brûler tout le combustible). Être en excès d'air par rapport à la stœchiométrie est souvent nécessaire pour limiter la formation de polluants (CO, NO_X). Dans un four, c'est la typologie de brûleurs (à air froid ou à air induit) et la consigne de température du four qui déterminent l'écart de température entre l'air comburant et les fumées.
Pour un four donné, il y a une température de fumées et un excès d'air optimal à définir. La température des fumées étant définie par les besoins process, il y a peu de marge de manœuvre de réglage sur ce paramètre.
Le pouvoir calorifique du gaz et les caractéristiques de l'air varient au cours du temps (masse volumique de l'air, température). Enfin, les brûleurs gaz peuvent se dérégler avec le temps, ils nécessitent donc une maintenance régulière.
A cause de ces variations de PCI ou de réglages des brûleur :

- Un manque d'air comburant entraîne une combustion incomplète avec la production d'imbrûlés, de suie, de CO, etc.
- Un excès d'air trop important dilue les fumées et augmente la consommation de combustible.

crédit photo : Getty Images

Généralement, les fours de métallurgie fonctionnent à charge partielle sur la majeure partie de leur temps de production, avec des niveaux de sollicitation des brûleurs à hauteur de 20 à 40 % de leur puissance nominale. **Il convient donc de s'assurer que le taux d'aération en air comburant, qui détermine l'excès d'air admis, est correctement réglé pour la puissance la plus représentative du fonctionnement des brûleurs.**

Les avantages d'une combustion bien réglée

L'optimisation de la combustion permet de limiter la formation de polluants tout en gardant un bon rendement, ce qui conduit à :
⇨ Des économies d'énergie,
⇨ Moins de combustibles imbrûlés,
⇨ Moins de monoxyde de carbone dans les fumées de combustion et par conséquent une réduction des risques pour la santé des opérateurs

Pour passer à l'action

- Dans le cas d'un brûleur à prémélange total, il faut maintenir l'oxygène libre minimal nécessaire dans les produits de combustion, soit typiquement 1 à 2% des fumées sèches, ce qui correspond à environ 10% d'excès d'air. Pour un brûleur à air pulsé à prémélange partiel (ou sans prémélange) l'excès d'air optimum sera proche de 20%.
Point de vigilance : Pour les brûleurs à prémélange partiel, l'excès d'air est généralement plus grand et dépend du process.
- Vérifier le taux d'O_2 dans les fumées en demandant un rapport de réglage au prestataire en charge de l'entretien des équipements.
- Identifier les niveaux de puissance les plus représentatifs du fonctionnement du four par un moyen de comptage en continu et régler la combustion sur ceux-ci.
- Utiliser des fours de dimensions adaptées. Si le four est trop grand, celui-ci va fonctionner à basse puissance rendant plus difficile un réglage optimum des brûleurs.
- Maîtriser les entrées d'air non souhaitées qui dégradent la fiabilité de la mesure de combustion en cheminée (voir fiche n° 2).

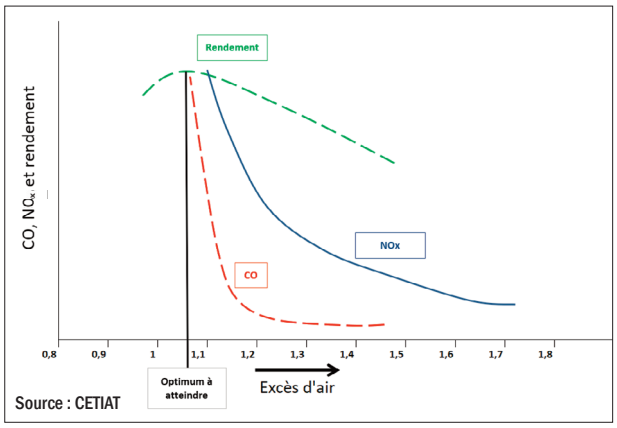
Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

RÉGLAGES DE LA COMBUSTION À LA STŒCHIOMÉTRIE POUR LES FOURS À GAZ

Pour passer à l'action (suite)

Point de vigilance : Quand l'air extérieur est utilisé comme comburant, les variations météorologiques font varier le débit massique d'air et donc l'excès d'air. Un réglage biannuel permet de prendre en compte la variation été/hiver et de cibler plus finement l'excès d'air optimum.

Le graphique ci-contre, présentant un exemple de rendement de combustion et d'émissions de CO et de NO_X en fonction de l'excès d'air, illustre le compromis à trouver entre rendement et émissions de polluants atmosphériques. Applicable aux brûleurs à air soufflé avec ou sans prémélange.



Réduction des consommations lors des phases de non-production

Intérêt technico-économique

Cas d'un four de réchauffage de 8 000 kW chauffant de l'acier à 600°C sur une base de 7 500 h/an et dont la combustion n'est pas correctement réglée (15% d'excès d'air au lieu de 8%)	Surconsommation (MWh/an)	Surcoût (k€)[1]	Émissions CO_2 (tCO_2/an)[2]
	1 278	40	305

[1] Sur la base d'un prix du gaz naturel à 31,3 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)
[2] Facteur d'émission : 239 g/kWh PCI (Source : ADEME)

Mise en œuvre de l'action :

TRI <1 an

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°8

VÉRIFICATION ET CALIBRAGE DE L'INSTRUMENTATION DES ÉQUIPEMENTS DE CHAUFFE

Contexte et enjeux

De nombreux instruments de mesure permettent de contrôler le bon fonctionnement général d'un four. Par ailleurs, certains équipements (brûleurs, registre de régulation de pression interne) sont réglés sur des valeurs spécifiques.
Les instruments de mesure et les réglages des équipements peuvent dériver au cours du temps.

Le suivi métrologique des instruments et la vérification des réglages des équipements permettent de surveiller et corriger cette dérive pour s'assurer d'une bonne maîtrise du process (sonde O_2 par exemple).

Les avantages de la vérification et du calibrage des instruments de mesure

- Les étalonner régulièrement et les maintenir permettent de maintenir une mesure fiable des performances et d'anticiper des dérives.
- Une meilleure maîtrise du process entraîne à la fois des gains énergétiques et une meilleure qualité des produits.

Pour passer à l'action

- Vérifier visuellement l'état et la propreté du matériel de mesures et de réglage, notamment ceux qui sont soumis à haute témpérature
- Faire contrôler de manière périodique tous les instruments de chauffe et de mesure par une société spécialisée ou par un service de maintenance équipé de matériel contrôlé métrologiquement
- Dans le cas de matériel contrôlé, tenir un dossier de suivi consultable aisément dans lequel sont reportés les plans d'instrumentation, les schémas PID, etc.
- Formation du personnel : il doit savoir où se situent les instruments de mesure et comment les inspecter

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

VÉRIFICATION ET CALIBRAGE DE L'INSTRUMENTATION DES ÉQUIPEMENTS DE CHAUFFE

Intérêt technico-économique

Exemple d'un four consommant 5 GWh par an de gaz et dont la consommation est sous-évaluée de 1,5% (compteur gaz vieux de 20 ans) :

- Au bout de 3 ans, l'énergie non comptée représente : 230 MWh soit 7k€[1]
- Au bout de 5 ans, l'énergie non comptée représente : 386 MWh soit 12 k€
- Au bout de 10 ans, l'énergie non comptée représente : 800 MWh soit 25 k€

[1]Sur la base d'un prix du gaz naturel à 31,3 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)

Mise en œuvre de l'action d'étalonnage en laboratoire accrédité par le COFRAC (budget d'environ 1 k€) lors des phases de maintenance de l'équipement

TRI rapide

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité
fonction du type de capteur et la capacité à le retirer

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

Retour d'expérience

Framatome, Le Creusot (71) Forge d'équipements lourds essentiellement pour l'industrie nucléaire.

"Dans notre secteur d'activité, la production est soumise à des contrôles qualité particulièrement stricts, dans ce cadre nous devons nous assurer que les mesures servant au process sont fiables. Les principaux capteurs étalonnés sont :
- Le capteur de pression servant au contrôle des brûleurs pour s'assurer des réglages de combustion (1 fois/an)
- Les sondes d'oxygène présentes dans les fours (1 fois/an).

Nous réalisons des contrôles des brûleurs tous les 6 mois afin d'éviter une dérive. A chaque contrôle de brûleur, les valeurs de réglages (pression d'air et de gaz naturel) propre à chaque brûleur sont vérifiées et réajustées si nécessaire. Cette opération est réalisée à l'aide d'un capteur de pression étalonné.
Une fiche de suivi (historique des interventions) des brûleurs est établie pour maitriser le risque de dérive."

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE

n°9

OPTIMISATION DES TEMPÉRATURES DE CONSIGNE

Contexte et enjeux

Pour s'assurer d'une bonne coulée en fonderie et, en forge, d'une température de pièce idéale malgré les hétérogénéités thermiques internes des fours, les pièces sont souvent chauffées plus que nécessaire avec un coefficient de sécurité propre à chaque industriel. Parfois, les opérateurs amplifient même ces coefficients.
Définir au plus juste cette surchauffe permet de réaliser des économies d'énergie importantes. De plus, cela réduit le risque d'évaporation d'éléments d'alliage volatiles.

crédit photo : Getty Images

Les avantages de l'optimisation des températures de consigne

- Réduction des consommations d'énergie
- Réduction des durées de chauffe

Pour passer à l'action

Afin de régler la chauffe / surchauffe au plus juste :

- Pour la fonderie, mesurer les vitesses de refroidissement des poches de transport de métal fondu par une mesure de température du métal en fonction du temps, et en tenir compte dans l'ajustement de la chauffe/surchauffe.
- Pour les forges, mesurer et maitriser les vitesses de refroidissement entre la sortie du four et le passage en presse.

Intérêt technico-économique

Impact d'une température de chauffe trop élevée de 20°C pour un four fonctionnant 48 semaines par an (rendement de four de 60%)	Surconsommation (MWh/an)	Surcoût (k€/an)[1]	Émissions supplémentaires (tCO_2/an)
Pour 150 t d'acier/sem., fusion par four à induction	251	24	25
Pour 100 t d'aluminium/sem., fusion par four à gaz	51	1,5	12[2]

[1] Sur la base d'un prix du gaz naturel à 31,3 €/MWh et de l'électricité à de 96 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)
[2] Facteur d'émission : 239 g/kWh PCI (Source : ADEME)

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

Intérêt technico-économique (suite)

Mise en œuvre de l'action :

TRI >1an

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

Retour d'expérience

Fonderie Saint Jean Industries,
Belleville-en-Beaujolais (69) : Fonderie d'aluminium principalement pour le marché de l'automobile.

"Cette action concerne le réglage de la température de consigne du chauffage des coquilleuses. Des résistances de préchauffage maintiennent celles-ci à une température de consigne pour production de 280°C.

Le préchauffage de coquilleuse permet de préchauffer les moules en amont de la production. Ceux-ci doivent en effet avoir une température bien précise pour faciliter la coulée et éviter les problèmes de qualité. Nous nous sommes rendu compte que l'apport en métal fondu était largement suffisant pour assurer le maintien en température lors de la production. Avant la modification, le chauffage électrique prenait le relais lors des "trous" de production à des moment où le besoin n'était pas présent. La température de consigne peut maintenant être abaissée de 20°C pendant les veilles et les week-ends.

Cette opération faisant partie d'un ensemble d'actions (réduction des temps d'arrêt sur des équipements de chauffe, optimisation de température en phase de veille de fours et programmation des mises en réduit) menées de front et destinées à réduire les consommations énergétiques du site, il n'a pas été possible de discerner chaque effet individuel. Mais globalement sur une année, nous avons constaté une réduction de la consommation du site de 18% malgré une augmentation de production de 14%.

Cette démarche a également permis un meilleur suivi du process et une maintenance réduite du fait que l'équipement s'abime moins à des températures moins élevées.

La mise en œuvre de cette action n'a pas nécessité d'investissement financier, uniquement des moyens humains : ajout par les automaticiens de fonctionnalités au monitoring déjà présent sur les fours, analyse et définition de nouvelles consignes en collaboration avec les équipes de production."

Cette démarche ayant porté ses fruits, la Fonderie Saint-Jean-Industries envisage de l'étendre à d'autres équipements du site.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°10

ENTRETIEN DES ÉCHANGEURS DE CHALEUR POUR LIMITER L'ENCRASSEMENT

Contexte et enjeux

En forge et en fonderie, des échangeurs sont utilisés notamment pour assurer la récupération de chaleur.
En fonction de l'usage et de la puissance de l'échangeur, un défaut d'entretien peut être plus ou moins coûteux.
Les fours de forge peuvent créer des fumées encrassant peu à peu les échangeurs : calamine, poussières... Si ces échangeurs ne sont pas ou peu nettoyés, leurs performances de récupération peuvent se dégrader.

Cas particulier des fours équipés de préchauffage d'air comburant
Dans le cas des brûleurs à air chaud (brûleurs régénératifs ou à vent chaud), l'enjeu économique est souvent important. En effet, ces brûleurs, dont l'air comburant est préchauffé sur les fumées au travers d'échangeurs thermiques (métalliques ou constitués de matrices en céramique), permettent de générer des économies d'énergie importantes par rapport à des brûleurs sans préchauffage : de -25% à -50% en fonction de la température de préchauffage.

crédit photo : Alamy

Les avantages d'échangeurs bien entretenus

- Maîtrise des consommations d'énergie et/ou de la capacité de production (maintien des performances des échangeurs notamment en récupération)
- Bonne maitrise du profil de température de la ligne de production

Pour passer à l'action

- Instrumentation : mesure des températures et pressions aux bornes de l'échangeur pour contrôler son bon fonctionnement et si nécessaire programmer des nettoyages en fonction de l'encrassement de l'échangeur.

- Faire un suivi des performances de l'échangeur en mesurant les températures aux entrées (côté cheminée) et aux sorties (côté air comburant du brûleur). Le suivi de la différence de pression aux bornes de l'échangeur contribue à la surveillance de l'installation.

- Inspection annuelle visuelle de l'état de l'échangeur à l'endoscope si nécessaire

Actions correctives pour brûleur régénératif : nettoyage, changement des céramiques
Actions correctives pour brûleur à préchauffage d'air : nettoyage mécanique si besoin

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

Intérêt technico-économique (suite)

Cas d'une dérive de 50 degrés sur le ΔT d'un échangeur de four de 5 000 kW fonctionnant 7 500 h par an :	Pertes instantanées (kW)	Surconsommation (MWh/an)	Surcoût (k€)[1]	Émissions supplémentaires (tCO_2/an)[2]
	335	2 518	79	600

[1] Sur base d'un prix du gaz naturel à 31,3 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)
[2] Facteur d'émission : 239 g/kWh PCI (Source : ADEME)

Mise en œuvre de l'action :

TRI entre 1 et 3 ans

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

Retour d'expérience

FMGC - Fonderie et Mécanique Générale Castelbriantaise, Soudan (44). Fabricant de contrepoids et lests en fonte disposant d'un cubilot à vent chaud

FMGC assure l'entretien régulier de son échangeur de préchauffage d'air comburant et de son échangeur préchauffant de l'huile thermique. Les échangeurs concernés par l'entretien sont :

- Échangeur air/air vent chaud : 2,9 MW (246 m^2 de tubes lisses)
- Échangeur fumées/huile thermique : 5 à 6 MW

L'énergie est récupérée sur le cubilot à vent chaud qui produit la fonte du site (capacité de 350 t/jour)
L'entreprise a constaté une dégradation de l'échange de chaleur sur l'échangeur vent chaud en observant des variations de la température des fumées et de l'air préchauffé pour le vent du cubilot.
L'échangeur encrassé entraînait une perte de rendement de 10 %, une surconsommation de combustible et des variations de température d'air comburant au détriment de la qualité de la fonte.
Les échangeurs air/huile et air/air sont à présent nettoyés en permanence par un grenaillage et une fois par mois par action manuelle. Le nettoyage mensuel engage quatre personnes pendant 8 heures.

À chaque arrêt mensuel, un contrôle de l'épaisseur des tubes des échangeurs est réalisé pour anticiper une éventuelle fuite. Les échangeurs les plus critiques sont changés tous les 3 et 5 ans.

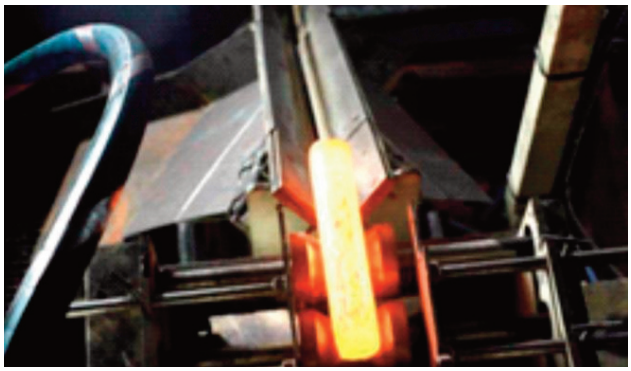
FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°11

ADÉQUATION ENTRE LE DIAMÈTRE DES LOPINS ET LA PLAGE DE L'INDUCTEUR

Cette fiche est destinée aux forges possédant des fours de réchauffage à induction.

Contexte et enjeux

Pour garantir de bonnes performances, il est nécessaire de s'assurer de l'adéquation entre le diamètre du lopin et la plage de l'inducteur.
En effet, si la taille de l'inducteur est inadaptée par rapport au lopin à chauffer, le couplage inductif est dégradé et la part de l'énergie transmise à la charge n'est pas optimum.
Cela s'observe généralement quand il y a un changement de production. L'inducteur n'est pas systématiquement adapté pour la nouvelle charge.



Chauffage par induction.
Source : ENRX, anciennement EFD Induction

Les avantages d'une plage d'inducteur adaptée

- Consommation électrique réduite
- Meilleure qualité de chauffe des lopins

Pour passer à l'action

Changer d'inducteur peut nécessiter un palan, du fait du poids de cet équipement, et peut être perçu comme fastidieux et/ou chronophage. Par ailleurs, il est parfois nécessaire pour ce faire de recourir à un personnel différent (équipe de maintenance). La plupart des actions pouvant permettre d'en faciliter le changement sont d'ordre organisationnel :

- Faciliter la manutention des inducteurs en installant des moyens de manutention adaptés

- Former l'opérateur à changer lui-même l'inducteur afin de le rendre autonome sur cette tâche

- Installer un compteur électrique (ou wattmètre) sur le poste pour pouvoir comparer la consommation électrique avec la puissance évacuée dans l'eau de refroidissement, et en déduire ainsi le rendement/les pertes. Si l'inducteur n'est pas adapté, les pertes thermiques se dissiperont dans l'eau. Ceci permettra également d'établir un suivi de l'indicateur masse chauffée / kWh consommé. Pour 1 kWh, 1,8 à 2,8 kg de métal peuvent être chauffés à 1250 °C.

- Investir dans des machines à plusieurs inducteurs sélectionnables : certains modèles de chauffage par induction disposent de plusieurs inducteurs montés sur un rail pouvant translater. Changer d'inducteur prend ainsi quelques minutes. Ce type d'équipement est cependant plus coûteux et plus encombrant.

Point de vigilance n°1 : Les pertes de rendement dues à une plage d'inducteur peu adaptée sont bien plus importantes pour des lopins de petits diamètres que pour ceux de grands diamètres.

Point de vigilance n°2 : Le pyromètre en place doit être correctement positionné. Si celui-ci est mal placé, la température de la charge peut être sous-évaluée et l'inducteur risque de surchauffer inutilement.

Pour aller plus loin : dans le cas de volumes de production importants, il est possible de demander à des sociétés spécialisées de simuler numériquement les chauffes par induction selon la nature de l'acier pour connaitre les conditions idéales de chauffe.

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

ADÉQUATION ENTRE LE DIAMÈTRE DES LOPINS ET LA PLAGE DE L'INDUCTEUR

Intérêt technico-économique

Un inducteur non adapté peut augmenter les pertes de couplage inducteur/lopin de 20 à 40% (en moyenne) par rapport à la consommation totale. Chauffant moins efficacement, il lui faudra plus d'énergie pour chauffer la même quantité de métal.

Cas d'une journée de travail de 8h avec un inducteur non adapté Dégradation de 30% de la consommation spécifique	Puissance supplémentaire	Surconsommation	Surcoût
	92 kW	740 kWh/jour	70 €/jour[1]

[1] Sur la base d'un prix de l'électricité de 96 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)

Mise en œuvre de l'action :

TRI
Immédiat si inducteur de taille adaptée déjà présent.
Si achat d'inducteur nécessaire, généralement < 3 ans (variable selon le rythme de production)

Niveau de gain **€€**€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

Retour d'expérience

Setforge Gauvin, La Monnerie-le-Montel (63) Production de pièces forgées de 1 à 5 kg destinées au marché de l'automobile.

Dans nos forges, le chauffage par induction est le premier des Usages Énergétiques Significatifs (UES) du site, suivi pour les 3 principales presses. Afin de réduire la consommation électrique de ses fours à induction, Setforge s'est appuyé sur la simulation numérique (prestation externe) pour connaitre les conditions idéales de chauffe d'une charge.

Nous avons réalisé cette étude sur un four de chauffe et deux alliages : inox et acier faiblement allié. Cela nous a permis d'engager une collaboration avec le constructeur de chauffeuse pour optimiser l'équipement.

L'étude par simulation numérique a permis d'identifier le potentiel d'optimisation maximal : 50 % de la consommation pour le cas d'étude. La sélection de la bonne plage de diamètre d'inducteur pour une charge permet un gain de 30% de consommation (20% sur d'autres paramètres).

Par ailleurs, l'étude a permis d'ajuster les rampes de montée en température en fonction des alliages afin d'optimiser le transfert thermique peau / cœur de pièces.

Nous devons étendre la démarche sur l'ensemble des chauffeuses du site (chauffe avant forge 100% induction).

Nous recommandons de s'appuyer sur les constructeurs pour définir le diamètre d'inducteur adapté pour la chauffe d'une pièce.

De manière générale, nous utilisons l'indicateur de performance énergétique en kg d'acier chauffé par kWh. Cet indicateur nous permet de suivre et valider la performance du système charge/ inducteur / chauffeuse.

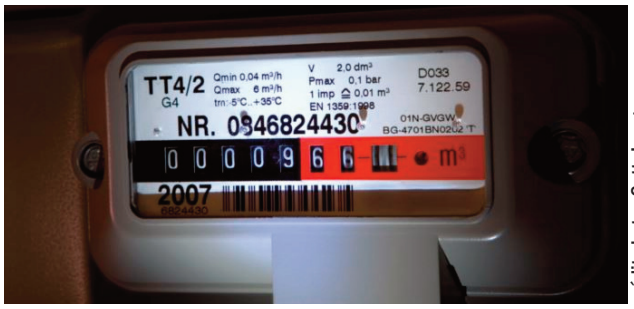
Cette démarche d'optimisation et d'adaptation par simulation numérique externalisée représente des coûts de l'ordre de plusieurs k€. Cependant, cette optimisation peut également être réalisée en interne avec des logiciels adaptés, sous réserve de disposer de personnel spécialisé en simulation numérique et de mener l'étude en lien étroit avec les équipes de maintenance afin de bien documenter les inducteurs (nombres de spires et diamètres des spires). Dans tous les cas, cette démarche s'inscrit sur le long terme.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°12

INSTALLATION DE SOUS-COMPTEURS D'ÉNERGIE SUR LES FOURS

Contexte et enjeux

Pour agir, il faut savoir ! Une bonne connaissance des postes consommateurs d'énergie dans une usine est un préalable à l'amélioration de la performance énergétique. Cela commence par un audit énergétique (peut être réalisé par un prestataire externe), qui permet de poser les enjeux énergétiques et de définir un plan d'actions. L'installation de sous-compteurs d'énergie alimente cet audit et permet de poursuivre dans la durée les actions entamées avec l'audit.



crédit photo : Getty Images

Les avantages d'installer des sous-compteurs d'énergie

- Facilite la connaissance et la compréhension des principaux postes consommateurs dans l'usine, ce qui permet une meilleure maitrise de ces postes.

- Facilite l'identification et la compréhension des raisons d'une variation globale de consommation énergétique en se focalisant sur celles observées au niveau des sous-compteurs

- Permet de suivre de manière plus fine le talon de consommation et d'identifier les postes consommateurs en fonctionnement réduit. → voir fiche n°14 (talon de consommation)

- Facilite le suivi de la performance énergétique

- Permet de mettre en place des Indicateurs de Performance Énergétique (IPÉ) par poste de consommation mesurée

Pour passer à l'action

Instrumenter les principaux postes de consommations, notamment :

- **En forge :**
  ➪ Fours de chauffe, groupe hydraulique des presses et/ou pilon.
- **En fonderie :**
  ➪ Fusion, traitement thermique, régénération thermique des sables
- **Pour les utilités :**
  ➪ Production d'air comprimé, traitement des fumées

Pour chacun de ces postes, des IPE sont proposés dans la fiche n°13.
S'appuyer sur les fournisseurs pour définir la technologie des compteurs. L'entreprise doit notamment, pour chaque point de mesure, déterminer la plage de fonctionnement (débit min/max) du compteur afin de sélectionner le capteur le plus approprié.

Prévoir dès la mise en place des compteurs un montage facilitant les opérations de maintenance et de vérification.

S'appuyer sur la norme NF EN 17267 (Plan de mesurage et de surveillance de l'énergie - Conception et mise en œuvre - Principes pour la collecte des données énergétiques).

Point de vigilance : l'instrumentation de la majorité des fluides (hors électricité) nécessite des travaux de tuyauterie. Il faut donc prévoir généralement une interruption technique le temps des travaux.

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

SUITE

n°12

INSTALLATION DE SOUS-COMPTEURS D'ÉNERGIE SUR LES FOURS

Intérêt technico-économique

Mise en œuvre de l'action :

TRI <1 an. Un compteur coûte quelques milliers d'euros

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Dans le cadre des Certificats d'Économie d'Énergie, la fiche IND-UT-134 permet d'aider du financement de compteurs et la mise en place d'un logiciel de suivi énergétique calculant des IPE, sous réserve notamment que la puissance installée des équipements de production concernés soit inférieure à 10 MW.

Retour d'expérience

Voir le retour d'expérience de la fiche n°13

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°13

MISE EN PLACE D'INDICATEURS DE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

Contexte et enjeux

La mise en place d'Indicateurs de Performance Énergétique (IPÉ) a pour principaux objectifs d'identifier et de suivre les équipements les plus consommateurs et ceux dont la consommation est susceptible d'être facilement optimisée. Par ailleurs, la mise en place d'IPÉ est nécessaire dans le cadre de la norme NF EN ISO 50001 (Norme internationale de management de l'énergie).

crédit photo : Getty Images

Les avantages des indicateurs de performance énergétique

La mise en œuvre d'IPÉ permet :

- De détecter des dérives de consommation des équipements
- De maintenir la performance énergétique de l'usine, en corrigeant les dérives identifiées
- D'identifier les équipements les plus consommateurs et/ou ceux dont la consommation est susceptible d'être facilement optimisée
- D'identifier les talons énergétiques dans le but de les réduire au minimum
- De vérifier si les mesures d'optimisation énergétique mises en œuvre induisent bien les gains énergétiques escomptés
- De suivre les progrès en matière d'efficacité énergétique au fil du temps
- À terme, de modéliser les consommations à venir en fonction du plan de production et de prédire les budgets associés

Une dégradation des IPÉs implique des investigations sur l'usage concerné afin de comprendre et d'agir.

Pour passer à l'action

- **Choix de l'indicateur et de la fréquence de suivi**

Un IPÉ est défini par l'entreprise selon ses besoins. Néanmoins, il est utile qu'il intègre dans sa conception deux éléments : **la consommation d'énergie** de l'usage (nécessité de comptage) et **des facteurs pertinents** qui influencent celle-ci.

Un facteur pertinent doit être quantifiable, avoir un impact significatif sur la performance énergétique de l'usage et varier régulièrement. Concrètement, cela peut être : le tonnage de métal entrant dans la production, le tonnage de métal utile produit, les heures de fonctionnement, etc.
La fréquence d'analyse peut être l'heure, le jour, la semaine, etc. selon les moyens mis en place pour la surveillance de la performance énergétique et la taille de l'usine.

Ces indicateurs doivent viser de préférence les Usages Énergétiques Significatifs (UES) : les usages avec les consommations les plus importantes et/ou les niveaux de gains potentiels les plus importants.

Quelques exemples des principaux usages et des IPÉ qui peuvent être suivis dans le secteur des forges et fonderies :

- **En forge :**
  - ⇨ Fours de chauffe : énergie consommée par tonne de métal chauffé (kWh/t)
  - ⇨ Groupe hydraulique des presses et/ou pilons : énergie (électrique) consommée par tonne de métal mis en forme (kWh/t)
- **En fonderie :**
  - ⇨ Fusion/traitement thermique : énergie consommée par tonne de métal fondu/traité (kWh/t)
  - ⇨ Régénération thermique des sables : énergie consommée par tonne de sable traité (kWh/t)
- **Pour les utilités :**
  - ⇨ Production d'air comprimé : énergie consommée par Nm^3 d'air comprimé (kWh/Nm^3)
  - ⇨ Traitement des fumées : énergie consommée par les ventilateurs et le dépoussiérage par m^3 de fumées traitées (kWh/m^3)

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

SUITE

n°13

MISE EN PLACE D'INDICATEURS DE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

Intérêt technico-économique

Les niveaux de gains dépendent de la maturité de l'entreprise en matière d'efficacité énergétique. Une entreprise amorçant sa démarche de performance énergétique a logiquement un potentiel de gains plus important.

Il est considéré que la mise en place et le suivi d'IPÉ permet un gain énergétique de 5 à 15% de la consommation de l'usage concerné. C'est la connaissance apportée par la mesure et le suivi qui permet d'identifier des pistes d'optimisation.

Mise en œuvre de l'action :

TRI
< 1mois hors installation de compteurs et logiciels
< 1 an si installation de compteurs et logiciels

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Dans le cadre des Certificats d'Économie d'Énergie (CEE), la fiche IND-UT-134 permet d'aider le financement de compteurs et la mise en place d'IPÉ sous réserve que la puissance de l'équipement installé soit inférieure à 10 MW.
Sont nécessaires pour être éligible à cette fiche : i) la réalisation d'une étude pour valider les IPÉ et le plan de comptage (conformité à la norme NF EN 17267) ; ii) la mise en œuvre d'un logiciel de suivi énergétique générant automatiquement des IPÉ (un tableur ne suffisant pas).

Retour d'expérience

Fonderie Saint Jean Industrie, Belleville-en-Beaujolais (69)
Fonderie d'aluminium principalement destiné au marché de l'automobile.

"Nous avons bénéficié des CEE pour l'installation de sous-compteurs. Ils ont été installés au fur et à mesure sur l'ensemble des utilités de l'usine entre 2017 et 2021. Cette action doit se faire de manière continue, pour évoluer avec les besoins du site et les changements d'usages énergétiques.
L'analyse à proprement parler des relevés de compteurs a commencé en 2022. Le logiciel de reporting par défaut était très générique et ne parlait pas au personnel pouvant utiliser ces données. Un travail a donc été entrepris pour rendre ces données plus adaptées et ajouter des IPÉ (kWh/t, $kgCO_2$/t, €/t) à notre environnement de travail au travers d'un logiciel plus spécialisé mêlant les données de production et les données énergétiques. Cela a permis de sensibiliser au sujet de l'énergie une partie plus large des membres de l'équipe.
L'analyse de ces relevés de compteurs a permis très rapidement d'identifier un four ancien consommant deux fois plus que les autres pour la même fonction. Auparavant, tous les fours répartis dans chaque zone de l'usine étaient allumés "par confort" et chargés au plus près. Désormais, ce four plus ancien a été mise à l'arrêt et n'est allumé que si les autres fours sont pleins. Plus de distance est parcourue dans l'usine pour charger les pièces dans les fours les plus efficaces, mais le gain est suffisamment significatif pour justifier ces temps de manœuvres supplémentaires.
Cette opération faisant partie d'un ensemble d'actions (réduction des temps d'arrêt sur des équipements de chauffe, optimisation de température en phase de veille de fours et programmation des mises en réduit) menées de front et destinées à réduire les consommations énergétiques du site, il n'a pas été possible de discerner chaque effet individuel. Mais globalement sur une année, nous avons constaté une réduction de la consommation du site de 18% malgré une augmentation de production de 14%.

Plus généralement, la lecture de ces indicateurs de performance énergétique apporte des éléments concrets et facilitent la prise de décision en rendant "visible" la dépense d'énergie et les conséquences de chaque action d'économie."

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°14

ANALYSE DU TALON DE CONSOMMATION

Contexte et enjeux

Le talon de consommation représente l'énergie consommée hors période de production, c'est à dire pendant les nuits, les week-ends, la fermeture estivale, etc. Il s'agit de la consommation minimale du site. C'est une charge fixe. L'identification et la compréhension des composantes du talon de consommation d'une usine est une source d'économies potentielles. Pour exploiter ce potentiel, une mesure horaire détaillée des consommations d'électricité et de gaz est nécessaire.

Dans une forge ou une fonderie, les principaux postes de consommation composant le talon sont les suivants :

- Production d'air comprimé
- Maintien en température des fours
- Ventilation des bâtiments et évacuation des fumées (fours à vide)
- Pompes de refroidissement
- Sablerie des fonderies

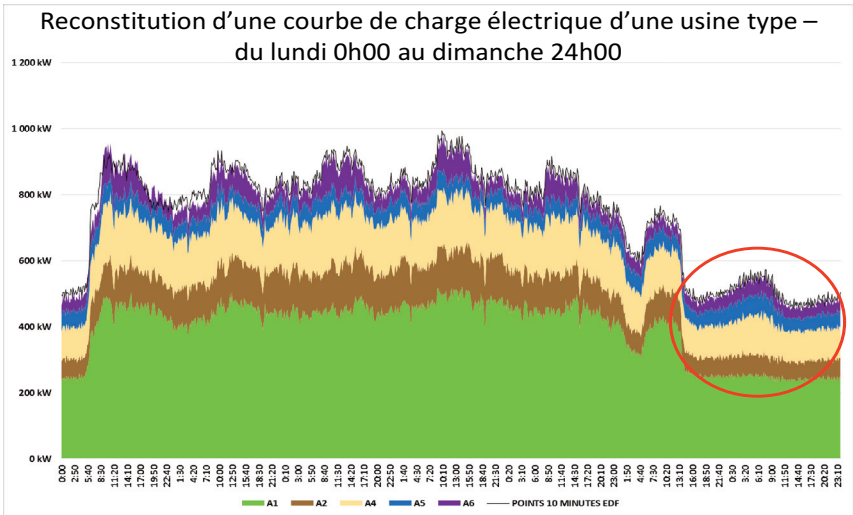
Les avantages de l'analyse du talon de consommation

- Identification du poids énergétique des différents postes de consommation
- Prise de conscience des quantités d'énergie consommées lors des phases de non production
- Préambule à la mise en œuvre d'actions de réduction de ce talon

Pour passer à l'action

- Identifier les postes de consommation composant le talon et leurs poids respectifs
- Identifier les postes de consommation les plus faciles à arrêter ou à optimiser
- Améliorer la compréhension des postes de consommation les plus importants afin de travailler à leur optimisation
- Sensibiliser les salariés à ce sujet
- Placer dans les ateliers un écran qui indique la consommation instantanée du site ou de l'équipement pour que les salariés identifient rapidement si des équipements sont restés allumés

Intérêt technico-économique



Cas du profil de consommation électrique d'une usine ne produisant pas les week-ends :
Sur l'illustration, un talon de 500 kW est clairement identifiable. L'analyse du talon de la zone A1 (en vert) de l'usine est à prioriser car c'est celle qui contribue majoritairement au talon global de l'usine.

Source : PROREFEI

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

Intérêt technico-économique (suite)

Mise en œuvre de l'action :

TRI < 1 an
concernant la mise à l'arrêt et la mise au ralenti d'équipements

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

L'analyse du talon ne présente pas de risque. La mise en œuvre d'actions pour réduire ce talon doit être précédée d'une analyse de risques, notamment en matière d'impact sur le process de production

Financements / aides financières potentielles

- Possibilité de financement par l'ADEME pour les entreprises de moins de 250 salariés, non soumises aux audits réglementaires : voir « Les aides financières pour réaliser un audit énergétique, une étude d'opportunités ou de faisabilité » sur le site web de l'ADEME
- Dans le cadre des Certificats d'Économie d'Énergie, la fiche IND-UT-134 sur les IPÉ couvre le comptage et donc la mise en évidence des talons de consommation (cf. Fiche N°12 Installation de sous compteurs d'énergie)

Note : si le dispositif des CEE est plutôt stable, les aides financières de l'ADEME peuvent évoluer régulièrement. N'hésitez pas à vous renseigner auprès de votre contact ADEME régional.

Retour d'expérience

FMGC - Fonderie et Mécanique Générale Castelbriantaise, Soudan (44). Fabricant de contrepoids et lests en fonte disposant d'un cubilot à vent chaud

La fonderie FMGC a mis en place une Gestion Technique du Bâtiment (GTB) / Gestion Technique Centralisée (GTC) et déployé des variateurs de vitesse sur ses plus gros équipements électriques, notamment ses ventilateurs, ses dépoussiéreurs et son éclairage.

Cinq variateurs de vitesse ont été installés sur les principaux ventilateurs, permettant une réduction de la vitesse de rotation de 5Hz ainsi que l'arrêt des systèmes d'aspiration lors des pauses d'équipes.

Les gains obtenus, observés grâce aux compteurs électriques installés sont de 427 MWh/an, soit une économie de l'ordre de 10 à 15% de l'usage concerné.

Par ailleurs, l'arrêt des systèmes de dépoussiérage pendant les pauses (grâce à la GTB) induit une baisse de consommation d'air comprimé, utilisé pour le décolmatage.

L'achat des variateurs a été principalement financé par les CEE, ce qui a permis un ROI inférieur à un an pour cette action. Les équipes de maintenance ont pu travailler en "temps masqué" pour installer les variateurs : l'immobilisation des équipements a duré deux samedis.

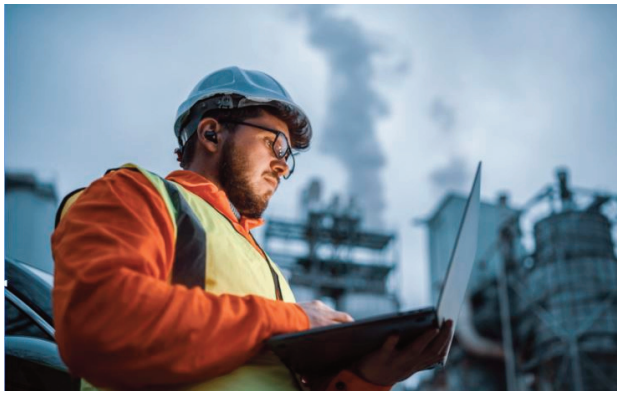
Le référent énergie du site, M. LEPAROUX (FMGC) conseille à ses confrères de sensibiliser le personnel aux équipements qui sont des consommateurs "invisibles", notamment en identifiant ceux qui restent en service mais sont non productifs. Il recommande également l'achat de matériel "plug and play" pour faciliter les travaux d'installation.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°15

OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE DU CYCLE DE PRODUCTION VIA LES FACTEURS ORGANISATIONNELS ET HUMAINS

Contexte et enjeux

Cette action consiste à déclencher une réflexion sur les facteurs organisationnels et humains qui améliorent le cycle de production d'un point de vue énergétique : réduction des temps d'attente, des charges à vide, des refroidissements et des pertes de matière.
L'énergie doit être intégrée dans les critères d'optimisation des process.
La mise en œuvre d'optimisations de type organisationnel peut engendrer des contraintes managériales et pour le personnel : les plannings de production et les durées de travail journalières peuvent être modifiés.



crédit photo : Getty Images

Les avantages de l'optimisation du cycle de production

- Meilleure connaissance et maîtrise des outils de production
- Diminution possible du temps d'ouverture de l'usine et donc des phases de mise en réduit plus longues (par ex. fermeture de site trois jours par semaine au lieu de deux)

Pour passer à l'action

- Effectuer des campagnes de mesures de température pour connaître les temps de montée et descente en température de chaque appareil (avec un pyromètre par exemple) et ainsi créer des checklists pour chaque équipement de chauffe, consignant les durées de chaque procédure et éventuellement le coût de chaque action
- Connaître les temps nécessaires aux opérations annexes : maintenance et réglages machines, nettoyages…

Cette connaissance permet de planifier au plus juste les périodes de chauffe et de coulées pour les enchaîner et donc de réduire les maintiens en température superflus.

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

SUITE

n°15

OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE DU CYCLE DE PRODUCTION VIA LES FACTEURS ORGANISATIONNELS ET HUMAINS

Intérêt technico-économique

Mise en œuvre de l'action :

TRI entre 1 et 3 ans

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

Retour d'expérience

Fonderie Saint Jean Industries, Belleville-en-Beaujolais (69)
Fonderie d'aluminium principalement pour le marché de l'automobile.

"La mise en place d'une démarche d'optimisation de notre (nos) cycle(s) de production nous a permis de réduire les temps d'arrêt de nos équipements de production, et donc d'améliorer le taux d'engagement de l'usine. Nous avons dû compter sur l'engagement du personnel et sommes revenus aux préconisations des fiches constructeur (cadence préconisée, montées en température, etc.). Cela a permis la remise en cause des "recettes de cuisine" basées sur des observations empiriques dont l'origine s'est perdue avec le temps et les changements de personnel.

Nous avons optimisé la température de chauffe de plusieurs fours de forge fonctionnant au gaz en diminuant la température de consigne pendant les phases de veille.

Il existait auparavant une mise en réduit à heure fixe du four de forge, dont la programmation était gérée par les automaticiens du site qui ne connaissaient pas forcément les enjeux de production.

Un travail de programmation a été entrepris pour que l'heure de remise en chauffe soit modifiable facilement sur un écran de supervision par le manager chargé de production qui est le mieux placé pour connaitre les besoins de l'équipe. Cela porte ses fruits surtout lors des changements d'équipe, des pauses, des jours fériés, ponts etc.

Cette action faisant partie d'un ensemble d'actions (réduction des temps d'arrêt sur des équipements de chauffe, optimisation de température en phase de veille de fours et programmation des mises en réduit) menées de front et destinées à réduire les consommations énergétiques du site, il n'a pas été possible de discerner chaque effet individuel. Mais globalement et sur un pas de temps d'une année, nous avons constaté une réduction de la consommation du site de 18% malgré une augmentation de production de 14%.

La mise en œuvre de cette démarche a également permis un meilleur suivi du process et une maintenance réduite du fait que l'équipement s'abime moins à température réduite."

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°16

ORGANISATION DES ÉQUIPES DE PRODUCTION POUR TRAVAILLER PENDANT LES HEURES CREUSES

Contexte et enjeux

Lorsque l'organisation du travail le permet et que l'entreprise dispose de tarifs d'électricité jour/nuit différenciés, il peut être envisagé d'effectuer les montées en température des fours la nuit. Cette action nécessite de prendre en compte le temps de fusion nécessaire pour la charge de métal engagée et ainsi prévoir l'heure optimale pour que la fusion soit disponible le lendemain matin à l'arrivée des équipes suivantes. Le maintien en température étant consommateur d'énergie, la durée entre la fin de la fonte et la coulée doit être la plus courte possible.
Les fours de traitement thermique peuvent aussi être utilisés préférentiellement la nuit pour bénéficier d'un meilleur tarif.

crédit photo : Getty Images

Cette démarche s'applique aussi au chauffage par induction avant forge, aux moteurs des machines et aux compresseurs d'air comprimé.

Les avantages et inconvénients de la production en heures creuses

- Optimisation de la facture électrique (les prix de l'électricité sont moins élevés la nuit ou en heures creuses avec certains contrats de fourniture)
- Soulage le réseau électrique en décalant une partie de la consommation pendant les heures creuses
- Si l'action n'est pas programmable ou requiert de la surveillance, nécessite de décaler les horaires de l'équipe de fusion

Pour passer à l'action

- Se renseigner auprès de son fournisseur d'électricité concernant les modalités tarifaires prévues au contrat et calculer les économies potentielles.
- Si le contrat n'intègre pas les heures creuses ou si le tarif n'est pas intéressant, le renégocier à la fin de l'engagement.

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

SUITE

n°16 ORGANISATION DES ÉQUIPES DE PRODUCTION POUR TRAVAILLER PENDANT LES HEURES CREUSES

Intérêt technico-économique

Cas d'une usine consommant 5 GWh/an en renouvellement de contrat faisant passer le tarif heures pleines (HP) de 80€/MWh à 300€/MWh.	Gain énergétique (MWh/an)	Surcoût sans flexibilité (k€/an)	Surcoût avec flexibilité (k€/an)	Gain grâce à la flexibilité (k€/an et %)
Passage en réaction d'une consommation en 80% HP/20% HC à 60% HP/40% HC[1]	0	870	720	150 et 17%

[1]Sur base d'un prix d'électricité en heure pleine à 300€/MWh et en heure creuse à 150€/MWh

Attention, ce calcul ne prend pas en compte la hausse du prix de la main d'œuvre liée à la mise en place d'horaires décalés.

Mise en œuvre de l'action :

TRI entre 1 et 3 ans

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

Retour d'expérience

SETFORGE, groupe spécialisé dans la production de pièces forgées.
Plusieurs sites du groupe ont décalé ou amplifié leur activité en heures creuses (de nuit).

L'intérêt de la mesure a été fixé par un écart de prix sur l'électricité : le tarif heures creuses (nuit & weekend) devait être quatre fois inférieur à celui de jour afin de compenser les surcoûts de salaire de nuit.

Les trois quarts de la consommation de SETFORGE ont été ciblés pour basculer ou augmenter leur activité en heures creuses.

Dans certains cas, cette réorganisation a été limitée par les contraintes réglementaires sur le bruit (seuils de bruit plus bas la nuit) et par le fait que certains sites travaillaient déjà la nuit ou le weekend.

Les gains sont essentiellement financiers, mais une réduction de la consommation d'énergie a pu émerger sur certains sites en réduisant les temps de veille (4 x10h nuit au lieu de 5x8h nuit). La bonne connaissance des consommations (compteurs à l'appui) a permis de cibler les postes les plus consommateurs (par exemple la forge plutôt que l'usinage).

Il est important de noter que le travail de nuit entraine des risques supplémentaires en matière de sécurité au travail et au niveau de la qualité (fatigue, risque d'erreurs, etc.), qui implique d'avoir un encadrement de nuit performant et une sensibilisation des salariés à ces risques accrus.

Cette démarche implique un dialogue social important en amont et pendant sa mise en place pour conserver le bon engagement des équipes. Une réactualisation de l'organisation du travail en fonction du prix de l'énergie doit être planifiée.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°17

GESTION DES ARRÊTS ET DÉMARRAGES DES ÉQUIPEMENTS THERMIQUES

Contexte et enjeux

La fiche 14 (analyse du talon de consommation) illustre le coût énergétique et financier dû au fait de garder en fonctionnement des équipements de production et des utilités pendant les nuits, les week-ends, etc.
La recherche de réduction des consommations lors des phases de non-production peut aussi se faire la journée. En effet, entre deux cycles de production, les équipements ne sont pas toujours mis à l'arrêt, soit par négligence, soit parce qu'ils nécessitent une phase de mise en régime du fait de leur inertie.

crédit photo : Alamy

Pour réduire ces consommations, il est nécessaire d'identifier les équipements concernés, d'évaluer la faisabilité technico-économique de leur extinction ou de la réduction de leur température, et de mettre en place des procédures pour optimiser les phases d'arrêt et de redémarrage et les températures de réduit.

Les avantages de l'optimisation des consommations lors des phases de non-production

- Économies d'énergie par la réduction des consommations pendant les phases de veille (par exemple, entre deux traitements thermiques)
- Meilleure maîtrise et compréhension de l'équipement industriel
- Responsabilisation des opérateurs face aux enjeux énergétiques

Pour passer à l'action

• **Identification :**

⇨ Cibler les équipements non utilisés mais toujours en fonctionnement

⇨ Prendre également en compte les utilités associées à ces équipements

• **Analyse et compréhension des causes du maintien en fonctionnement de l'équipement :**

⇨ S'interroger sur les raisons du maintien allumé et sur les possibilités d'arrêt des équipements en veille/tournant à vide

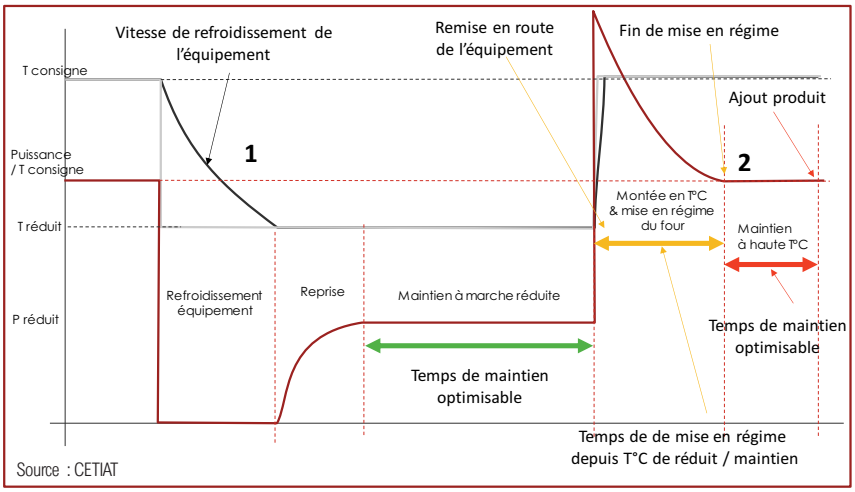
⇨ Prendre en compte les contraintes d'inertie des équipements thermiques : Identifier, pour les équipements avec inertie, les vitesses de refroidissement et les temps de remise en régime. Pour définir ces informations, mesurer la puissance (compteur d'énergie) et la température lors d'une phase d'arrêt et d'une phase de relance tel qu'illustré dans le schéma ci-dessous :

▶ Le refroidissement d'un four suivra toujours la même courbe de refroidissement. Cela permet de prédire la température du four en fonction du nombre d'heures d'arrêt (point 1)

▶ Lorsque le four est en régime, sa puissance appelée se stabilise, toute sa masse est à la même température (point 2)

Les temps de mise en régime des fours sont parfois très importants, la mesure permet de caractériser la durée minimale de remise en régime à partir de l'établissement du point 2.

Réduction des consommations lors des phases de non-production



: Courbe de température du four : Régime de fonctionnement du brûleur

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

GESTION DES ARRÊTS ET DÉMARRAGES DES ÉQUIPEMENTS THERMIQUES

Pour passer à l'action (suite)

• Exemples de mise en œuvre organisationnelle facilitant l'arrêt d'équipements :

o Il se peut que certains équipements restent allumés parce que le personnel n'est pas compétent/habilité pour l'éteindre et l'allumer. Pour cela, former le personnel à l'allumage et la mise à l'arrêt des équipements en respectant les rampes de température prédéfinies.

o Mise en place de checklists de mise à l'arrêt et de mise en route de l'équipement par l'opérateur, listant entre autres les équipements consommateurs d'énergie à arrêter (vanne d'arrivée d'air comprimé, pompe de refroidissement, etc…).

o Mise en place de règles de réduits ou d'arrêt par équipement thermique tenant compte des spécificités de celui-ci.

Intérêt technico-économique

Mise en œuvre de l'action :

TRI <1 an

Niveau de gain €€€
en fonction du nombre d'équipes (Plus l'équipement connaît des phases de non-production importantes (ex : fonctionnement en 1x8 ou 2x8), plus le gain économique est important)

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/ process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

Intérêt technico-économique

Setforge Bouzonville (57)
Forge de pièces de grandes dimensions.

"Nous avons mis en place un outil d'aide à la décision pour choisir entre l'extinction ou le maintien en veille des fours de réchauffage de pièces (1250 °C, pièces de grande dimension jusqu'à 1 t).
L'outil s'appuie sur :
- une modélisation des consommations en fonction de la température de consigne (réalisée à partir des relevés de compteurs et de températures de consigne des fours).
- les rampes de montée et descente en température des fours.

Il compare ainsi le coût d'un redémarrage à celui d'un maintien pour différents cas de figures : la nuit, arrêt entre postes et autres arrêts de production.
Une comparaison entre un redémarrage et maintien en chauffe permet de choisir la situation la plus économique. Cet outil (modèle) intègre le fonctionnement du four dans les rampes de montée et descentes en températures, et s'appuie sur les compteurs et les températures de consignes du four. "
Le site de SETFORGE Bouzonville n'a pas encore suffisamment de retour d'expérience sur cette action pour en quantifier précisément les bénéfices mais il la juge pour l'instant concluante.

FICHE ACTION
FORGE
FONDERIE
n°18

UTILISATION DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE POUR L'OPTIMISATION DE LA MISE AU MILLE

Contexte et enjeux

Toute pièce de fonderie nécessite de couler un métal ou un alliage dans un moule. Il en existe plusieurs types : sable, coquille, à cire perdue, etc.
Les fondeurs cherchent à concevoir des moules qui produisent des pièces conformes à la qualité requise. Le critère énergétique était souvent considéré comme secondaire par rapport à la qualité du produit, ce qui avait pour conséquence d'augmenter la masse de métal coulé par rapport à la pièce finie. Historiquement, leur conception était fondée sur un savant mélange de règles de dimensionnement et d'expérience. Il est désormais possible de combiner qualité et efficacité énergétique grâce à la simulation numérique.

crédit photo :Unsplush

Les avantages d'un moule optimisé

- Moins de défauts sur la pièce et par conséquent moins de non-conformités, et donc de pertes de production.
- Pas de dépenses supplémentaires dues à une sur-qualité.
- Moins de volume de métal perdu dans les masselottes et donc moins d'énergie utilisée par pièce finie : gain économique et gain en capacité de production.

Pour passer à l'action

• Optimisation du moule par simulation numérique
La simulation numérique est désormais bien répandue sauf chez les "petits fondeurs" (entreprises de moins de 50 salariés) ou pour les petites séries. Son usage est d'autant plus pertinent que le niveau de qualité requis est élevé et que l'investissement initial est lissé sur de grandes séries de production (pièces pour l'automobile par exemple).

Deux types de simulation sont possibles :
- Simulation de refroidissement de la pièce (modélisation rapide, prix réduit) : utilisée pour observer l'évolution de la pièce une fois coulée. **Une étude de ce type coûte environ 5 k€.**
- Simulation de l'écoulement du métal liquide dans le moule puis du refroidissement de la pièce : utilisée pour observer la circulation du métal en fusion dans le moule. **Une étude de moulage complète peut coûter entre 10 et 20 k€.**
Ces simulations permettent de mieux comprendre l'apparition des défauts et donc comment y remédier.

• Utilisation de masselottes isolées
Une masselotte est une masse de métal que l'on ajoute au-dessus des parties volumineuses d'une pièce de fonderie, destinée à nourrir la pièce pendant son refroidissement pour éviter les contractions volumiques et les fissures. La masselotte doit rester liquide pour jouer son rôle.
Les masselottes sont classiquement dans la masse du moule. L'isolation de la masselotte via un manchon constitué d'un matériau différent, permettant de conserver la chaleur, peut permettre de réduire de 30 à 70% le volume de la masselotte pour le même temps de solidification.
Moins de volume de masselotte = moins de métal engagé et d'énergie nécessaire à la fonte de ce métal

Les manchons sont des consommables et entraînent un coût. Une analyse technico-économique est à réaliser afin de confirmer la pertinence de ce coût supplémentaire au vu des économies de métal et d'énergie induites.

Fiche coréalisée par la Fédération Forge Fonderie, GRDF, GRTgaz, ALLICE, CETIAT et CETIM

UTILISATION DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE POUR L'OPTIMISATION DE LA MISE AU MILLE

Intérêt technico-économique

● Pour le cas d'une pièce fondue en acier classique de 1 dm3 soit 7,8 kg, l'isolation de la masselotte permet de passer d'une masse de métal de 4,7 kg à 1,6 kg :

Coût initial par pièce fondue (€)	Économie induite par l'isolation de la masselotte (matière + gaz) (€)	Économie par pièce
12.6	3,2[1]	-25%

[1] Sur base d'un prix de l'acier à 1 000€ la tonne et d'un prix du gaz naturel à 31,3 €/MWh (Source Enerdata, année 2019)

Mise en œuvre de l'action :

TRI : Dépend du volume des pièces

Niveau de gain €€€

Niveau de complexité

Niveau d'investissement

Niveau de risque/process

Financements / aides financières potentielles

Il n'existe pas de dispositif de financement pour cette action.

PRINCIPALES AIDES AU FINANCEMENT DES ACTIONS D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

1. Certificats d'Économie d'Énergie (CEE) :

Le financement d'investissement à l'aide de certificats d'économie d'énergie peut être obtenu auprès d'opérateurs CEE.
Les investissements les plus courants sont décrits dans des fiches standardisées disponibles ici : https://atee.fr/efficacite-energetique/club-c2e/fiches-doperations-standardisees/industrie

Les fiches standardisées citées dans le guide sont les suivantes :

- Fiche CEE n° IND-UT-131 "Isolation thermique des parois planes ou cylindriques sur des installations industrielles"
- Fiche CEE n° IND-UT-134 "Système de mesurage d'indicateurs de performance énergétique"

Il existe de nombreuses autres fiches standardisées pertinentes pour les forges et les fonderies, elles requièrent des investissements plus importants que ceux visés dans ce guide. Cependant, certaines offrent un niveau de financement très intéressant qui aboutit à un temps de retour sur investissement inférieur à un an.

Les investissements moins courants, donc ne faisant pas l'objet de fiches standardisés, peuvent aussi être financés par des CEE. Pour cela, il est nécessaire de monter un dossier d'opération spécifique pour lequel il est préférable de faire appel à un bureau d'étude spécialisé.

2. Aides à la connaissance de ses flux énergétiques et de leurs potentiels d'amélioration :

- **Diag Éco-Flux,** à destination des TPE/PME. Programme d'accompagnement personnalisé sur 12 mois et cofinancé à 50 % par l'ADEME, le dispositif vise à optimiser les flux d'énergie, de matière, d'eau et de déchets de l'entreprise par le biais d'une analyse de pratiques, de la définition d'un plan d'action, de l'accompagnement au déploiement d'actions et de l'évaluation des économies réalisées.
www.bpifrance.fr ⇨diag-eco-flux

- **Aide à l'audit énergétique en industrie,** à destination des PME et des sites industriels de moins de 250 salariés (accompagnement jusqu'à 70 % du coût) qui ne sont pas soumis à l'audit énergétique par la réglementation. L'audit énergétique consiste en l'identification des dépenses énergétiques et des sources d'économies possibles sur le site, et en la hiérarchisation d'actions à mettre en œuvre.
https://agirpourlatransition.ademe.fr ⇨entreprises

• **Diag Décarbon'Action**, à destination des PME/ETI < 500 salariés n'ayant jamais réalisées de bilan d'émission de gaz à effet de serre. Programme d'accompagnement sur 6 à 8 mois et cofinancé à 50 % par l'ADEME, le dispositif vise à la réduction de l'impact carbone des entreprises par le biais d'un plan de mesure des émissions (scopes 1, 2, 3), de la définition d'action et de sa valorisation pour passage à l'action (traduction en stratégie RSE, engagements…)
https://diagdecarbonaction.bpifrance.fr/

• **Aides aux études de projet d'amélioration de la performance énergétique** ou de décarbonation d'entreprises industrielles, à destination des PME et des sites industriels de moins de 250 salariés (accompagnement jusqu'à 70 % du coût). Cette aide soutient la réalisation d'études de diagnostic, de faisabilité, de prospection ou d'expérimentations préalables au déploiement d'un projet d'investissement en faveur de la transition énergétique.
https://agirpourlatransition.ademe.fr ⇨entreprises

3. Amélioration de la gestion de l'énergie : démarche globale et système de management :

La programme PACTE industrie regroupe différentes actions qui visent à appuyer les entreprises dans leur démarche de gestion de l'énergie et de décarbonation. Ce programme est initié par l'ADEME et l'ATEE et rassemble les dispositifs suivants :

o **PRO-SMEn :** financement de l'accompagnement au déploiement d'un Système de Management de l'Énergie sur sites et à l'obtention de la norme ISO 50001. https://pro-smen.org/

o **PRO-REFEI :** formation subventionnée de référents énergie sur sites et accès à une communauté de référents énergie. https://www.prorefei.org/

o **ACT Pas à pas et ACT Evaluation :** formation et accompagnement stratégique, à destination des dirigeants d'entreprise, sur la trajectoire de décarbonation de l'entreprise (déjà disponible).

o **Accompagnement aux études d'opportunités sur le mix énergétique**
https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises ⇨aides-financieres ⇨2023

o **Accompagnement et conseil à l'accélération de projets de décarbonation, à destination des décideurs financiers** (disponible à partir de janvier 2024).

4. Aides à l'investissement :

• **Prêt Économies d'Énergie**, à destination des TPE/PME de plus de 3 ans (prêt de 10 à 500 K€, limité à 40 % de l'investissement). Ce prêt sans garantie permet de cofinancer les équipements éligibles aux CEE ainsi que les diagnostics, prestations, matériels et travaux qui y sont associés. https://www.bpifrance.fr/catalogue-offres

• **Prêt Vert, à destination des PME de plus de 3 ans** ayant réalisé un Diag Eco-Flux ou bénéficié d'une aide ADEME au cours des 3 dernières années (prêt de 10 k€ à 1 M€). Ce prêt facilite les investissements et dépenses immatériels (formation, recrutement, études, certifications…), les investissements matériels à faible valeur (équipements de stockage, de mesure, travaux de rénovation…) et l'augmentation des fonds de roulement lorsque les investissements sont réalisés dans le cadre de projets d'optimisation des procédés, de l'amélioration des performances environnementales (eau, énergie, décarbonation, matière) ou de la réduction de l'impact des produits. https://www.bpifrance.fr/catalogue-offres

Pour aller plus loin :
Moteur de recherche de financements aux niveaux national et régional : https://les-aides.fr/

Edition : Novembre 2023

Fédération Forge Fonderie
La Fédération Forge Fonderie est l'organisation professionnelle des entreprises de mise en forme des métaux par procédés de forge ou de fonderie (avec les activités associées que peuvent être, par exemple, la fabrication additive ou l'usinage).
www.forgefonderie.org

GRDF
Gaz Réseau Distribution France
Principal gestionnaire de réseau de distribution public de gaz en France, GRDF distribue le gaz à plus de 11 millions de clients au moyen du plus grand réseau de distribution européen. GRDF, à travers ses actions en faveur du biométhane, de l'efficacité énergétique et de la décarbonation, s'engage à faire du réseau de gaz un vecteur essentiel de la transition énergétique au bénéfice de ses clients.
www.grdf.fr

GRTgaz
GRTgaz est le 2ème transporteur européen de gaz, fort de 32 618 km de canalisations et 640 TWh de gaz transporté. GRTgaz assure des missions de service public pour garantir la sécurité d'acheminement auprès de ses 879 clients (expéditeurs, distributeurs, industriels, centrales et producteurs de biométhane). Entreprise innovante en pleine transformation pour adapter son réseau aux défis écologiques et numériques, GRTgaz est engagée en faveur d'un mix gazier français 100% neutre en carbone en 2050.
www.grtgaz.com

ALLICE
ALLiance Industrielle pour la Compétitivité et l'Efficacité Énergétique
ALLICE est une structure d'animation ayant pour vocation de fédérer et d'innover pour décarboner l'industrie. Réunissant des acteurs de tous les secteurs industriels et de toute la chaîne de valeur, ALLICE mise sur le collectif pour produire des études techniques, soutenir les offreurs de solutions performantes et accompagner les industriels dans l'accélération de leur décarbonation.
www.alliance-allice.com

CETIAT
Centre technique des industries thermiques et aérauliques
Organisme expert pour les études, les essais, les étalonnages et les formations, le CETIAT (Centre Techniques des Industries Aérauliques et Thermiques) met à disposition des industriels des moyens et des compétences pour mieux concevoir, développer et fabriquer leurs produits et procédés, évaluer et améliorer leurs performances. Depuis 60 ans, le CETIAT accompagne les industriels dans l'optimisation de leurs process de production et la maîtrise de leurs consommations d'énergie.
www.cetiat.fr

CETIM Centre Technique des Industries Mécaniques
Le Cetim, centre de référence des technologies mécaniques, est l'accélérateur de la transformation de l'industrie. Avec la fusion du CTIF, le Cetim accompagne pleinement la décarbonation et les virages technologiques de la profession. Une nouvelle étape qui permet de renforcer nos actions au service de 20 professions industrielles.
www.cetim.fr