

Développement de la trempe bi-fréquence simultanée pour décarboner le traitement des pignons automobiles

L'IRT M2P et ses partenaires du secteur automobile ont mené des travaux de développement de procédés de renforcement superficiel pour des composants de transmission de puissance dans le cadre du projet TRANSFUGE (2018-2024). L'un des axes de développement majeur de ce projet porte sur la technologie de trempe par induction bi-fréquence simultanée en substitution des procédés thermochimiques comme la cémentation pour des réductions significatives des coûts, des variabilités process et de l'impact environnemental.

Pierre-Emmanuel Aba-Perea,
Gaël Fick
IRT-M2P, Matériaux
Métallurgie et Procédé,
France

INTRODUCTION

La trempe de contour, ou trempe superficielle, par induction est un procédé de renforcement superficiel qui provoque un durcissement par transformation de phase et génère des contraintes résiduelles de compression proches de la surface. Comme pour les traitements thermochimiques, l'objectif de la trempe de contour est de traiter les composants sur une profondeur de plusieurs centaines de microns à quelques millimètres.

Elle est particulièrement appliquée pour les composants mécaniques en acier, qui requièrent une tenue à la fatigue de contact accrue, comme les roulements pour lesquels des gammes sont déjà largement modélisées et industrialisées^[1]. Contrairement aux traitements par lots que sont la cémentation ou la nitruration, la trempe de contour par induction est un traitement pièce-par-pièce, ce qui permet d'éviter la variabilité sur une charge et donc d'améliorer la répétabilité du traitement et d'intégrer le traitement dans une chaîne de production directement en sortie de forgeage par exemple. La cadence est accrue grâce à un temps de cycle très court ne dépassant pas quelques secondes.

Enfin, l'impact environnemental peut être mieux maîtrisé, en ne faisant pas intervenir d'effluent gazeux et en réduisant l'énergie de chauffe.

La profondeur de traitement est directement liée au temps de traitement, généralement de l'ordre de quelques dixièmes de secondes, et à l'effet de peau, phénomène électromagnétique qui cause la concentration des courants induits en surface des pièces chauffées sur une épaisseur notée δ et qui dépend du matériau et des paramètres procédés :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu_0 \mu}} \quad (1)$$

où ρ est la résistivité du matériau, f la fréquence dans l'inducteur et la pièce, μ_0 la perméabilité magnétique du vide et μ la perméabilité magnétique relative du matériau chauffé. La zone affectée thermiquement lors de la chauffe par induction d'une pièce en acier, est en partie austénitisée. La pièce est ensuite trempée par aspersion d'une solution aqueuse de polymère en suspension d'une concentration allant de 12 à 15 %, ce qui va permettre une transformation martensitique, générant ainsi les gradients de dureté et de contraintes résiduelles requis.

Le traitement de géométries complexes, telles que les pignons, requiert une maîtrise particulière des paramètres procédés de chauffe pour atteindre un profil durci sur le contour de la denture. En effet, selon la gamme de fréquence utilisée, le courant induit se concentrera préférentiellement soit en fond de denture, soit en sommet de denture. La technologie Simultaneous Dual Frequency (SDF[®], ou bi-fréquence simultanée), développée et brevetée par Eldec^{®[2]} consiste à superposer des courants de deux fréquences différentes dans l'inducteur, ce qui permet d'obtenir une concentration de courant uniforme en surface de la denture et ainsi de transformer la microstructure sur tout le contour de la pièce comme présenté dans la Figure 1.

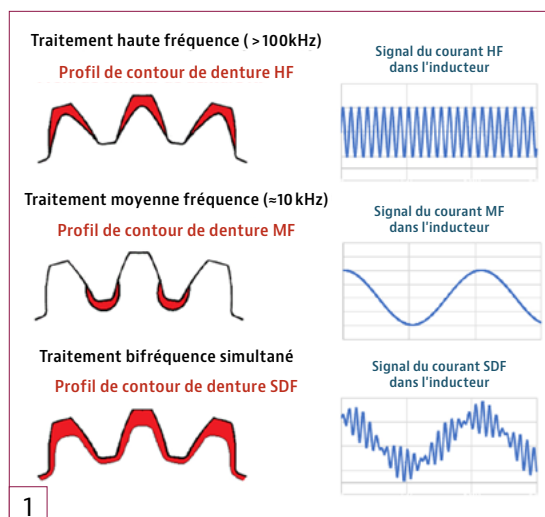


Figure 1.
Profils de traitement de denture et signaux de courant associés

Des travaux ont été menés à l'IRT M2P pour développer des gammes de traitement de trempe bi-fréquence simultanée sur des composants de transmission de puissance en acier. La réponse métallurgique de différents aciers a été évaluée et une gamme spécifique a été développée sur un démonstrateur de pignon à denture hélicoïdale. Enfin, pour vérifier que les réductions de consommations énergétiques associées au traitement par induction permettent également des réductions d'impacts environnementaux, une analyse de cycle de vie (ACV) a été réalisée. L'application de cette méthodologie a permis de comparer les impacts de la chaîne de traitement induction et celle de cémentation actuellement pratiquée dans l'industrie automobile, avec une approche globale (de l'élaboration de la pièce à son traitement final) et pour une large gamme d'impact environnementaux.

Figure 3. Évolution des points de transformation austénitique Ac1 et Ac3 en fonction de la vitesse de chauffe (échelle logarithmique) pour 3 nuances d'aciers

LA PLATEFORME

Les développements dans cette étude ont été réalisés sur une machine Eldec MIND 750 (Figure 2), équipée de la technologie SDF® (bi-fréquence simultanée) et de deux générateurs, un à haute fréquence (100 à 350 kHz) d'une puissance nominale de 200 kW et un à moyenne fréquence (10 à 13 kHz) d'une puissance nominale de 450 kW. La machine est instrumentée avec un pyromètre bichromatique pour le suivi de la température maximale en surface des pièces traitées, d'un oscilloscope permettant de mesurer le signal du courant bi-fréquence, ainsi que d'un système de collecte automatique et continu des données issues du générateur et du système de trempe.

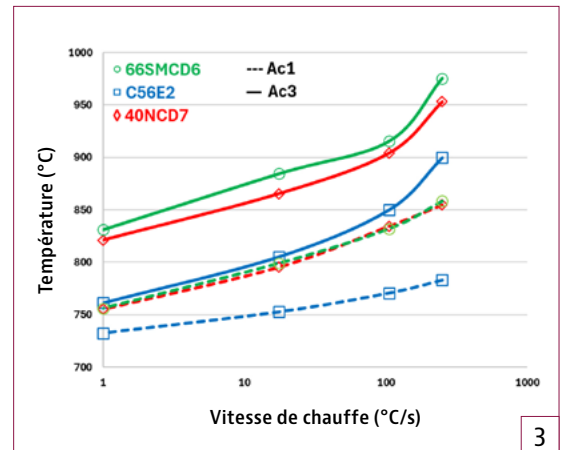


Figure 2. Plateforme Induction Eldec® pour le traitement bi-fréquence simultanée, à l'IRT M2P de Metz

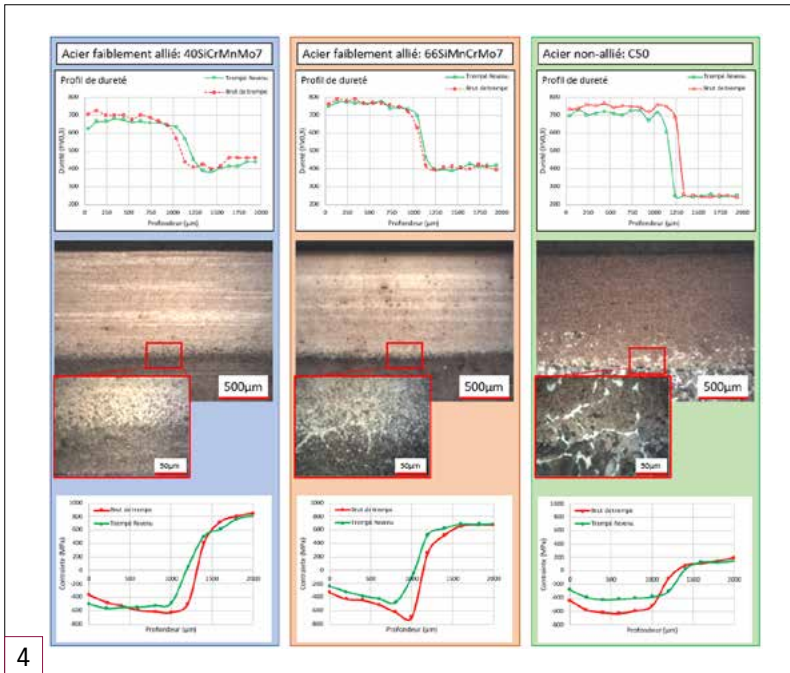
RÉPONSES MÉTALLURGIQUES DES MATÉRIAUX TRAITÉS PAR INDUCTION

La trempe de contour par induction pour des pièces de transmission est appliquée sur des aciers faiblement alliés, non-alliés, fortement alliés et inoxydables selon les besoins opérationnels. Dans le secteur des transports comme l'automobile, on retrouve notamment des nuances non-alliées à l'état ferrito-perlitique avant trempe de contour et aussi fréquemment des nuances faiblement alliées à l'état trempé revenu avant trempe de contour. Les éléments d'alliages vont jouer un rôle de premier ordre dans les transformations de phase qui se produisent au cours de la chauffe rapide et de la trempe

par aspersion. Dans les années 1970, Orlich a démontré que les points de transformation austénitique Ac1 et Ac3 sont fortement impactés par la vitesse de chauffe^[3]. En effet, plus la vitesse de chauffe est élevée, plus les points de transformation sont éloignés des valeurs à l'équilibre, ce qui est le cas des traitements par induction pour lesquels des vitesses de chauffe de plusieurs centaines à plusieurs milliers de °C/s sont mesurées. La Figure 3 présente les points de transformation Ac1 et Ac3 pour différentes nuances et vitesses de chauffe mesurées au dilatomètre Bähr.



Des essais de trempe de contour par induction ont été réalisés sur une large gamme de nuances d'aciers afin de caractériser la réponse métallurgique en fonction de la composition de l'acier traité. La Figure 4 présente les caractérisations métallurgiques réalisées sur une sélection de deux nuances d'aciers faiblement alliés présentant des taux de carbone différents et une nuance d'acier non-allié. Les deux nuances d'acier faiblement alliés sont à l'état trempé revenu avant la trempe de contour. On observe pour ces deux nuances des couches traitées homogènes avec des plateaux de dureté à 700 HV pour la nuance à 0,4 %m de carbone et 800 HV pour la nuance à 0,66 %m de carbone. La zone de transition avec la microstructure initiale correspond à la chute de dureté. En comparaison la nuance non-alliée à l'état initial ferrito-perlitique, présente un écart de dureté bien plus important entre le cœur, à 250 HV et le plateau de dureté de la zone traitée à 750 HV. La zone de transition est moins nette que pour les aciers faiblement alliés car elle présente des traces de ferrite qui se caractérisent par des chutes de dureté locales. Les profils de contraintes résiduelles montrent tous une zone de compression dans la couche traitée, avec le pic de compression proche de la zone de transition pour les nuances faiblement alliées, le maximum à - 700 MPa est mesuré pour l'acier le plus chargé. Des contraintes de traction de rééquilibrage sont observées juste après la zone de transition avec de fortes intensités pour les deux nuances faiblement alliées. Les traitements de revenu à 200 °C/1h appliqués à ces nuances entraînent des chutes de dureté d'environ 50 HV pour les nuances les moins chargées et la relaxation des contraintes semble bien plus importante pour la nuance non-alliée que pour les faiblement alliées.



4

Figure 4.

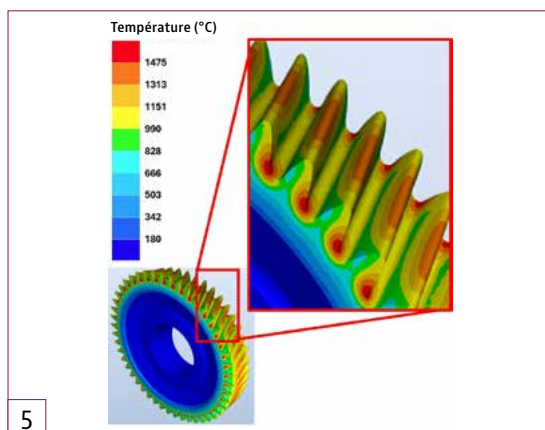
Profils de dureté, micrographie et profil de contraintes résiduelles de contours de trempe induction sur trois nuances d'aciers

TREMPE DE CONTOUR SUR DÉMONSTRATEUR

Une gamme de traitement a été développée sur un pignon hélicoïdal automobile en acier non-allié C56E2. Le module de denture du pignon est de 1,7, le diamètre extérieur est de 95 mm et l'épaisseur de 21,4 mm. Cette géométrie est complexe à traiter car la taille de denture est faible, il faut donc beaucoup de puissance sur un temps très court pour traiter le contour de la dent sur une profondeur contrôlée. L'utilisation de bi-fréquence simultanée est indispensable pour traiter le fond de dent en même temps que le sommet de denture. L'angle d'hélice de la denture, de 32°, donne lieu à un phénomène de concentration des champs inductifs propre aux pignons hélicoïdaux^[4], connu sous l'appellation « fingernail effect » qui provoque un décalage du contour de traitement sur l'épaisseur du pignon. Ce phénomène est mis en évidence en Figure 4 dans une modélisation avec un solveur thermo-électromagnétique sur le logiciel FORGE® de la chauffe induction du pignon hélicoïdal avec un inducteur simple spire. Les fonds de denture présentent des profils thermiques asymétriques caractéristiques du « fingernail effect ». Une méthode mise en œuvre pour

Figure 6.

Évolution microstructurale en fond de dent du pignon hélicoïdal : a) état de réception, b) après trempe induction bi-fréquence simultanée, c) après remise en solution partielle par induction, d) après remise en solution partielle et trempe induction bi-fréquence simultanée.



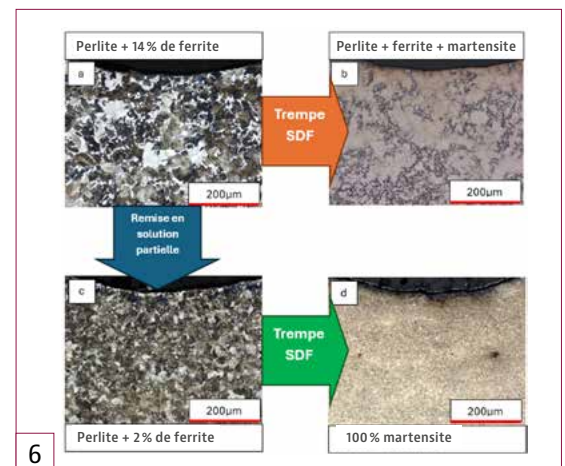
5

Figure 5.

Modélisation thermique de la surface du pignon hélicoïdal traité par induction avec un inducteur simple spire.

réduire cet effet est d'utiliser un inducteur asymétrique, breveté par Eldec^[5] qui permet de chauffer les surfaces inférieure et supérieure du pignon entre deux spires, puis d'effectuer la chauffe circconférentielle de la denture avec une partie mono-spire (Figure 5).

L'état initial microstructural du pignon est ferrito-perlitique. Il est possible de traiter un tel état métallurgique en trempe de contour par induction comme observé dans la section précédente. Cependant, une taille de grain de ferrite importante (ici quelques dizaines de µm) dans la microstructure initiale nécessite un temps de maintien après chauffe pour permettre une austénitisation complète de la zone à traiter, ce qui n'est pas compatible avec les courtes durées de chauffe lors de la trempe de contour. Comme observable dans la Figure 6, un traitement par induction directement appliqué sur une microstructure ferrito-perlitique grossière ne permet pas d'obtenir un profil trempé homogène. Un traitement d'affinage de la microstructure a donc été mis au point en appliquant une faible puissance (12 kW) à moyenne fréquence pendant quelques secondes, suivi d'un refroidissement à l'air en amont de la trempe de contour. Ce traitement de remise en solution partielle permet de réduire la taille des grains de ferrite avant la trempe et ainsi de faciliter l'austénitisation complète de la zone traitée pour obtenir un contour trempé 100 % martensitique conforme aux spécifications.



6

Le traitement de trempe de contour a donc été développé en incluant une première mise en solution partielle suivie d'une chauffe rapide en deux étapes, une première chauffe des surfaces inférieure et supérieure pendant 0,5 s puis une chauffe circconférentielle de la denture pendant 0,3 s comme présenté en Figure 7. La puissance nominale de la plateforme induction de l'IRT M2P a été nécessaire pour réaliser ce dernier traitement, soit 650 kW en bi-fréquence.

La conformité du traitement est évaluée sur un ensemble de critères relatifs à la dureté incluant la valeur de dureté du plateau, qui doit être supérieure à 700 HV, ainsi que la profondeur conventionnelle (PC) qui est la profondeur à laquelle 80 % de la dureté superficielle est atteinte et doit être comprise entre 0,5 et 0,7 mm en fond de dent. Le critère métallurgique implique une transformation martensitique complète dans la zone traitée avec

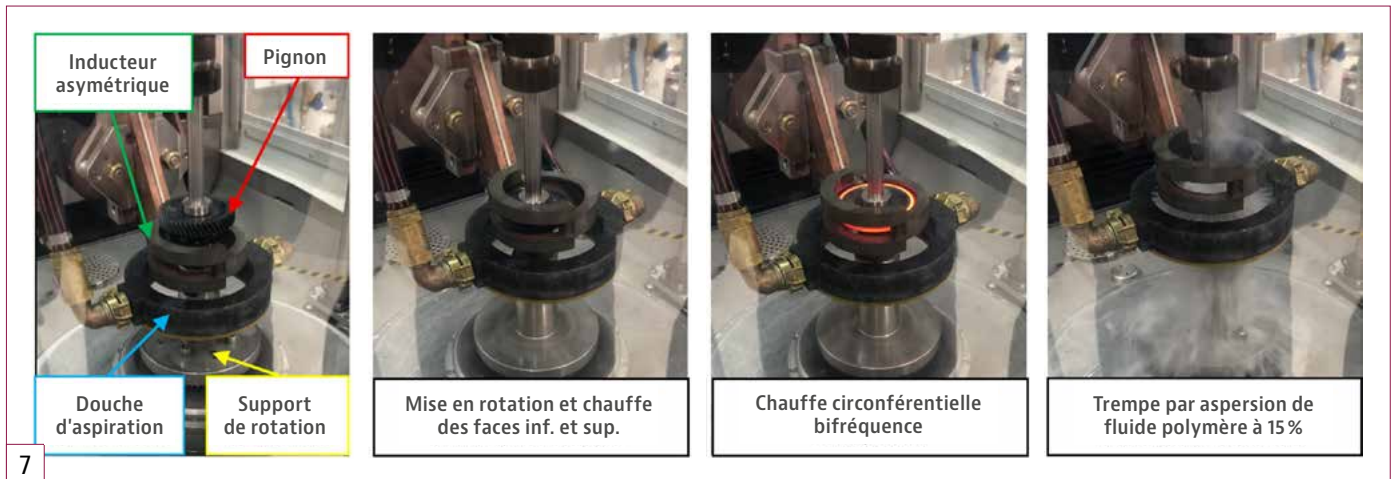


Figure 7. Étapes de la trempe induction du pignon hélicoïdal.

l'absence de ferrite sur les 80 % de la couche traitée à partir de la surface. Enfin, le taux de contour (TC) doit être de minimum 50 %, il est lié à la hauteur de denture H et aux profondeurs conventionnelles en sommet et fond de dent par l'équation suivante :

$$T_{C} = \frac{H + PC_{\text{sommet}} - PC_{\text{fond}}}{H} \quad (2)$$

Pour évaluer la répétabilité du traitement, 50 pignons ont été traités avec exactement la même gamme. La Figure 8 présentent les résultats d'analyse de dureté des couches traitées en fond de denture pour 6 pignons prélevés aléatoirement parmi les 50 pignons traités de façon similaire. Tous les pignons analysés présentent des

profils de trempe conformes du point de vue des critères de dureté, métallurgiques et de taux de contour, avec très peu de variation d'une pièce à l'autre, ce qui démontre une excellente répétabilité du procédé.

CARACTÉRISATION FONCTIONNELLE

Les pignons en C56E2 traités par induction ont été testés sur un banc de flexion pied de dent en chargement quasi-statique et en fatigue cyclique (R=0,1, Fréquence=25 Hz, Maximum 2.106 cycles de chargement) et comparés avec les pignons de série en 20MC5 cémentés. La Figure 9 présentent les résultats de ces essais mécaniques. On constate des performances comparables avec un léger abattement de 12% en fatigue et un gain de 15% en flexion quasi-statique pour les pignons en C56E2 traités par induction par rapport aux pignons de série en 20MC5 cémentés. Des gains de performances sont encore réalisables en optimisant le procédé ou en travaillant sur la nuance d'acier.

Figure 8. Analyse des profils trempés par induction en fond de dent des pignons hélicoïdaux.

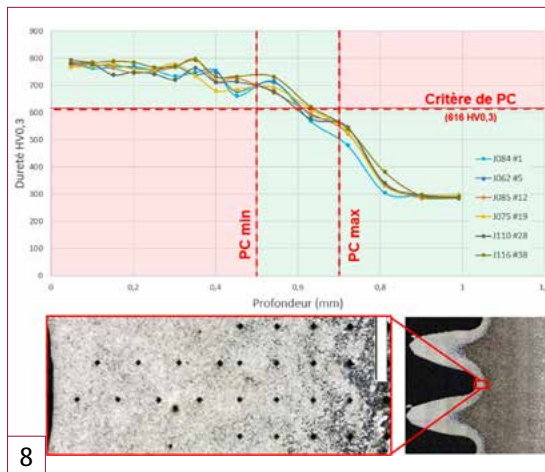
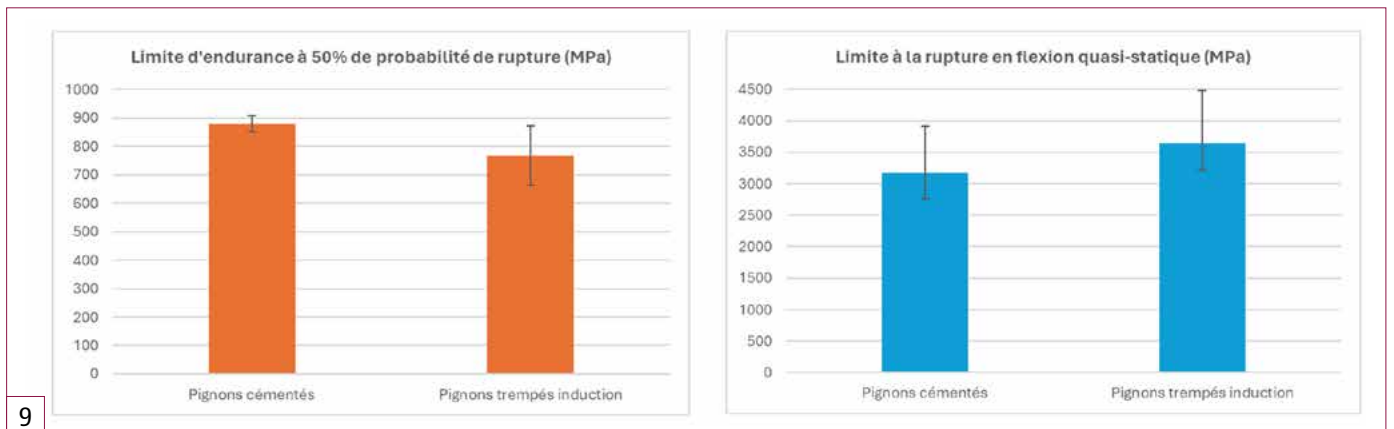
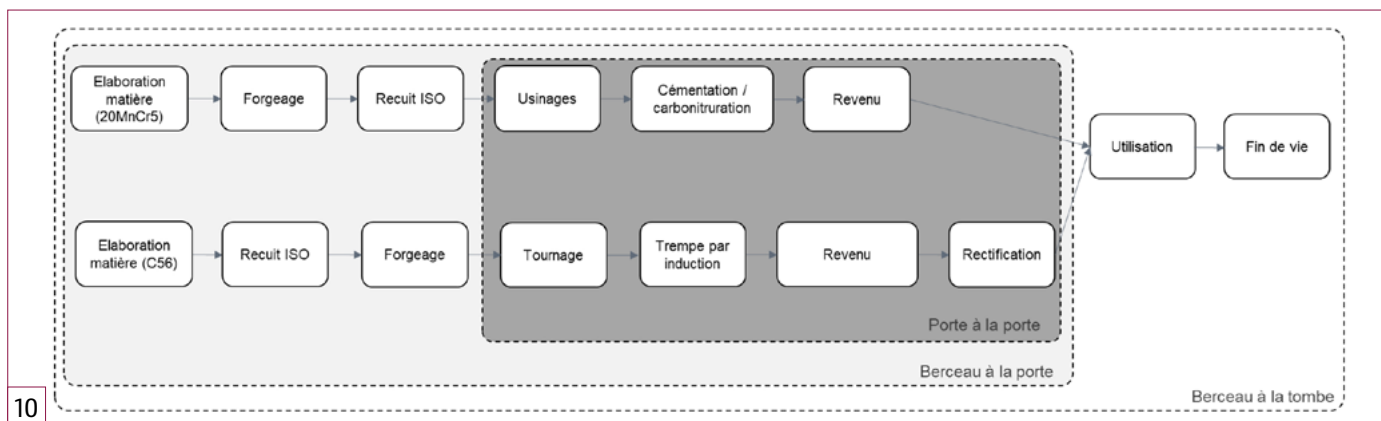


Figure 9. a) Limite d'endurance b) limite à la rupture des pignons trempés par induction comparés aux pignons cémentés de série.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L'Analyse du Cycle de Vie est l'outil d'analyse environnementale le plus utilisé par les industriels cherchant à réduire les impacts environnementaux de leurs activités. Basée sur la norme ISO 14 044:2006, cette méthodologie permet de quantifier les impacts des produits sur l'ensemble de leur cycle de vie et pour une large gamme de catégories d'impacts (climat, santé humaine, écosystème et consommation de ressources).





10

Les travaux effectués comparent deux technologies de traitement des aciers pour des pièces du secteur automobile, par cémentation basse pression (notée CBP) et trempe par induction (notée TPI). L'objectif est de quantifier les impacts environnementaux de ces deux gammes de traitement et d'identifier les sources d'impacts et les potentiels d'amélioration des performances environnementales. Ce type d'étude constitue une brique nécessaire à la réalisation d'ACV complètes pour des produits complets (voitures).

Les ACV classiques sont réalisées sur le cycle de vie complet de produits, de l'extraction des matières premières nécessaires à leur production, jusqu'à leur fin de vie (approche dite « du berceau à la tombe »). Pour cette étude, focalisée sur des gammes de production, il est plus pertinent de restreindre le périmètre à une vision « berceau à la porte » vis-à-vis des produits concernés — ici les pièces qui subissent le traitement (Figure 10). Cela inclut l'ensemble des opérations définies dans les gammes considérées, à savoir l'élaboration du métal, la mise en forme des pièces, les traitements, et d'éventuelles phases logistiques intermédiaires.

Pour s'assurer de comparer les deux gammes sur la base d'un même service rendu, on définit une « Unité Fonctionnelle » (UF), unité simple et commune aux deux gammes, quantifiant la fonction des processus investigués. L'UF définie ici est le traitement d'un pignon en acier d'une masse de 1,6 kg, présentant des propriétés mécaniques spécifiques recherchées.

Chaque gamme a fait l'objet d'une modélisation dans le logiciel LCA for Experts (Sphera) permettant d'évaluer les impacts sur cinq catégories : acidification (A), changement climatique (CC), toxicité humaine (TH),

appauvrissement de la couche d'ozone (ACO) et appauvrissement en ressources minérales (ARM). La modélisation des gammes nécessite des données détaillées pour chacune des étapes, et en particulier les consommations de matières premières, d'énergie et de consommables, et les émissions associées. Ces données proviennent de plusieurs sources : mesures internes (gaz et électricité des équipements), de données constructeurs, d'hypothèses, de modélisations spécifiques et de bases de données métier. Les résultats obtenus peuvent ensuite être analysés aussi bien globalement par gamme qu'au niveau de chaque étape.

La Figure 11 affiche les impacts relatifs de chaque gamme pour chaque catégorie d'impact retenue (gauche), et les parts d'impact respectives de leurs étapes sur le changement climatique (droite). La gamme cémentation participe le plus significativement sur tous les impacts investigués. Trois principales étapes sont responsables de la majorité des impacts sur le changement climatique :

- L'élaboration du métal : responsable de 30 à 45 % des impacts selon la gamme,
- L'usinage (tournage, rectification ...) : 20 à 30 % des impacts,
- Le traitement thermochimique/par induction en lui-même, et les autres traitements thermiques (revenus et recuits) : environ 30 % des impacts pour la gamme CBP, autour de 10 % pour la gamme TPI.

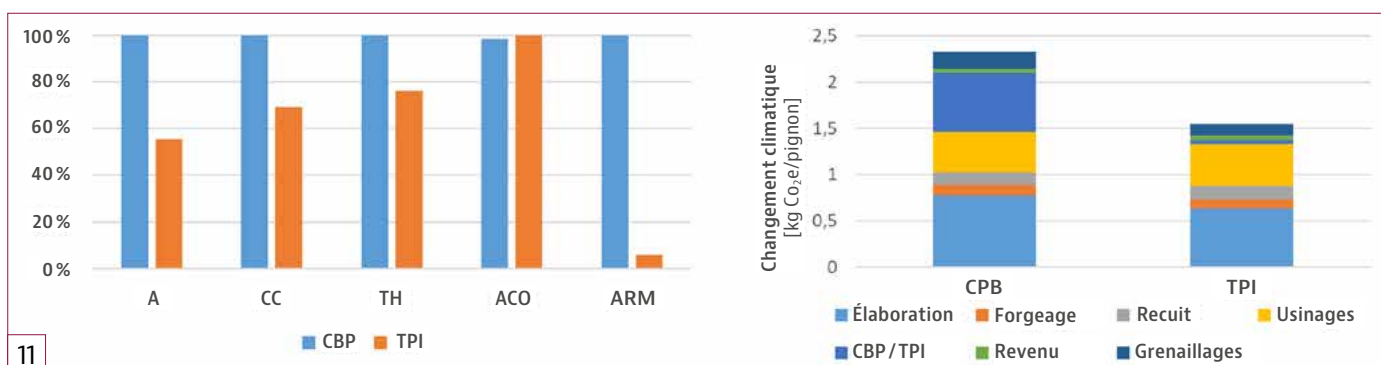
Ces résultats permettent de chiffrer et comparer les impacts environnementaux des deux gammes de production de pignons, montrant le gain du passage de la gamme cémentation à TPI, essentiellement du fait de la consommation d'énergie réduite, mais aussi de la réduction des consommables (gaz de trempe, notamment).

Figure 10.

Ensemble des opérations constituant les gammes investiguées (CBP en haut et TPI en bas), et aperçu des différents types de périmètres.

Figure 11.

a) Impacts relatifs des deux gammes, détaillant les parts d'impact respectives de leurs différentes étapes, pour les cinq catégories d'impact retenues ;
b) Focus sur la catégorie changement climatique (calculs effectués avec la méthode EF3.1, et en considérant un mix électrique français).



11

Ils apportent également des informations d'intérêt pour les démarches d'éco-conception. En effet, d'importants impacts sont associés à l'ensemble du processus de production (environ 2 à 2,5 kg CO₂ eq/pignon), ce qui représente environ 10% des impacts de l'ensemble du cycle de vie de la pièce, utilisation comprise. L'ACV a permis de montrer que, pour de telles pièces, l'élaboration du métal est prépondérante, et que les étapes de traitements thermiques et thermo-chimiques ne sont pas négligeables (jusqu'à 25% de l'impact de production de la pièce). Des axes d'amélioration peuvent être identifiés, par exemple, l'importance du choix des nuances d'acier et la voie de production du métal ou de l'optimisation des traitements, en réduisant le temps de traitement, en optimisant les lots de pièces pour réduire les consommations d'énergie rapportées à chaque pièce, par exemple.

Des résultats encourageants

La trempe induction bi-fréquence montre des résultats très encourageants sur une géométrie de pignon automobile.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La plateforme de trempe induction bi-fréquence simultanée de l'IRT M2P est capable de traiter une large gamme de nuances d'aciers et de durcir des contours sur des pièces complexes dont les caractéristiques géométriques rendent le traitement en monofréquence impossible. La trempe induction bi-fréquence montre des résultats très encourageants sur une géométrie de pignon automobile avec des performances comparables à celles d'un pignon cémenté et une très bonne répétabilité des profils obtenus. Un gain de performance est réalisable en travaillant d'une part sur la matière et d'autre part sur l'optimisation des paramètres procédés. Les outils numériques, notamment le logiciel FORGE® qui permet dorénavant de modéliser la trempe bi-fréquence, sont des outils qui pourront servir à mieux comprendre les phénomènes physiques en lien avec le procédé et donc orienter les potentielles améliorations.

Le faible impact environnemental de la trempe induction en fait un argument majeur pour substituer les traitements thermo-chimiques. L'analyse de cycle de vie comparative montre que l'utilisation du procédé de trempe induction réduit d'environ 50% les impacts environnementaux liés aux traitements de renforcement, ce qui est une évolution nécessaire pour tenir les objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cet article sont issus d'un projet IRT M2P cofinancé par le PIA (Plan d'Investissement d'Avenir) et un consortium de partenaires industriels. En particulier, les résultats présentés viennent d'une étude initiée par le groupe de travail Automobile qui incluait Amandine Philippot d'ASCOMETAL, Céline Berthod et Cyril Cochet de VALEO, Christian Grente de Renault SA, Marc Courteaux de STELLANTIS, Jean-Michel Jachmich et Thomas Picot d'ARCELORMITTAL, Camille De Giorgio, Bastien Toubhans, Thibault Roy, Maria-Rita Chini, Julien Valette et Florian Wagner de l'IRT M2P. ■

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ^[1] V. Lejay et J. Barnier, (2018) Le traitement thermique par induction : du générateur jusqu'à la trempe grâce à la simulation numérique, *Traitements et Matériaux*, 453
- ^[2] W. Schwenk, A. Häussler, A. Heiliger, (2002) EP1363474B1, European Patent Office
- ^[3] J. Orlich (1973) *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle*. Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf
- ^[4] F. Möckel, J. Werner. *Praktische Erfahrungen beim Induktivhärten schrägverzahnter Bauteile*. (1981).
- ^[5] C. Krause, (2013) WO201.410.8124A1, World Intellectual Property Organization