



DOSSIER

TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

l'expertise technique et scientifique de référence

m1205

Traitements thermiques superficiels des aciers

Par :

Yves DESALOS

Florence LE STRAT

Docteurs ès sciences, Ingénieurs chez Renault SA

Ce dossier fait partie de la base documentaire
Traitements thermiques superficiels et thermochimiques
dans le thème **Traitements des métaux**
et dans l'univers **Matériaux**

Document délivré le 21/05/2012

Pour le compte

7200049069 - arts et metiers paristech // 193.48.193.78

Pour toute question :

Service Relation Clientèle • Éditions Techniques de l'Ingénieur • 249, rue de Crimée
75019 Paris – France

par mail : infos.clients@teching.com ou au téléphone : 00 33 (0)1 53 35 20 20



Traitements thermiques superficiels des aciers

par **Yves DESALOS**

et **Florence LE STRAT**

Ingénieurs chez Renault SA

Docteurs ès sciences

1. Périmètre et spécificités	M 1 205 - 2
1.1 Place dans la famille des traitements de surface.....	— 2
1.2 Panorama des procédés de traitement thermique superficiel.....	— 3
1.3 Poids industriel relatif des procédés envisagés.....	— 5
1.4 Atouts et handicaps de ces procédés.....	— 7
2. Potentialités de ces traitements en termes de tenue mécanique	— 7
2.1 Amélioration de la résistance à la fatigue.....	— 7
2.2 Résistance aux sollicitations de surface.....	— 9
2.3 Contribution des contraintes résiduelles en surface.....	— 9
2.4 Synthèse comparative.....	— 10
3. Limitations thermiques et métallurgiques de ce type de traitement	— 11
3.1 Limites imposées par la thermique du chauffage.....	— 11
3.2 Limitations imposées par la métallurgie.....	— 12
3.3 Aide et limites des simulations numériques.....	— 18
4. Matériels pour la mise en œuvre industrielle de ces traitements	— 19
4.1 Sources d'énergie.....	— 19
4.2 Machines de présentation des pièces et postes de travail.....	— 19
4.3 Outils de chauffage.....	— 19
4.4 Outils de trempe.....	— 21
4.5 Matériels périphériques.....	— 21
4.6 Moyens de contrôle. Assurance qualité.....	— 21
5. Exemples de réalisations industrielles avec chauffage par induction	— 22
5.1 Industrie automobile.....	— 22
5.2 Autres secteurs industriels.....	— 23
6. Axes de développement de ces procédés	— 23
6.1 Durcissements de contour par induction des dentures.....	— 23
6.2 Contrôles en ligne des procédés.....	— 24
6.3 Conception d'inducteurs assistée par simulation numérique.....	— 24
6.4 Reprises de traitement localisées sur pièces difficiles.....	— 24
6.5 Intégration industrielle de sources plus flexibles.....	— 24
7. Conclusions	— 25
Pour en savoir plus	Doc. M 1 205

Les traitements thermiques superficiels des pièces en alliages ferreux sont destinés à améliorer leur résistance à la fatigue ou (et) à l'usure en durcissant les zones critiques superficielles par des apports thermiques suffisamment brefs et localisés pour confiner les effets structuraux. Les cycles thermiques associés visent soit un chauffage rapide localisé d'austénitisation en phase solide (typiquement quelques secondes au-delà de 800 °C) suivi de trempe naturelle ou forcée, soit une refusion superficielle suivie du refroidissement permettant l'évolution structurale désirée (par exemple : transformation de fonte grise en fonte blanche).

À côté de ces traitements par seul apport thermique, se développent aussi des traitements avec refusion superficielle en présence d'un matériau d'apport sous forme de pré-dépôt ou poudre projetée : simple enrichissement, recouvrement par un nouvel alliage, inoculation de particules dures ou réfractaires...

Nous n'aborderons dans le présent article que la famille de traitements sans matériau d'apport, en nous attachant essentiellement au durcissement en phase solide des aciers.

Dans ce dernier domaine, économiquement important pour les industries mécaniques, la plus large place revient au **durcissement superficiel par trempe après chauffage par induction électromagnétique** (source thermique sous-cantonnée de courants induits haute fréquence).

L'essor de ce procédé est lié à ses avantages techniques et économiques :

- limitation économique (rendement) et modulable des apports énergétiques ;
- disponibilité (délai de mise en œuvre) et souplesse de la source ;
- cycles rapides et non polluants autorisant le traitement en chaîne de fabrication ;
- qualité des pièces traitées en ce qui concerne la reproductibilité du durcissement, les risques de déformations, la facilité de mise en compression naturelle des surfaces, la faible épaisseur affectée par l'oxydation de celles-ci.

Le développement plus particulier de ces traitements dans l'industrie automobile a accompagné la mise au point de générateurs et d'inducteurs adaptés aux fortes cadences, ainsi que de transferts automatisés permettant une gestion industrielle à flux tendu.

D'autres sources thermiques capables de puissances surfaciques importantes, telles que : **lasers** continus ou impulsifs, **faisceaux d'électrons**, **torches plasma**, permettent des localisations énergétiques plus précises encore que l'induction et commencent à faire l'objet d'applications industrielles en durcissement superficiel. Malgré des coûts d'investissement descendus à des niveaux raisonnables, elles sont encore surtout retenues pour des traitements difficiles quant à l'accès et aux détails des zones à traiter.

1. Périmètre et spécificités

1.1 Place dans la famille des traitements de surface

Le périmètre des traitements considérés s'inscrit dans la première des quatre catégories traditionnelles de traitement des surfaces [37].

■ Traitements par transformation structurale, sans matériau d'apport

Seule la structure métallurgique superficielle du substrat est modifiée.

Cette évolution structurale peut se faire par voie mécanique (galeage, grenailage), ou thermique. Dans ce dernier cas, seul à nous intéresser, on peut rester en phase solide pour le durcissement par

transformation martensitique des alliages ferreux s'y prêtant, ou passer par la phase liquide, pour transformer par exemple de la fonte grise en fonte blanche.

■ Traitements thermochimiques par diffusion

Le matériau d'apport peut être soit un élément non métallique (cémentation, nitruration, boruration), soit un métal (chromisation, aluminisation...).

■ Traitements de conversion

Le matériau d'apport réagit chimiquement avec la surface du substrat (phosphatation, chromatisation, anodisation).

■ Revêtements

L'apport peut se faire par voie humide (électrolyse, réduction chimique), au trempé (galvanisation, étamage...), par voie sèche ou gazeuse (PVD, CVD), ou encore par projection (flamme ou plasma).

Nous ne nous intéresserons qu'aux durcissements de surface des alliages ferreux susceptibles de transformations allotropiques en phase solide (généralement, la tempe martensitique), accessoirement au cas où les évolutions structurales ont lieu après refusion locale (pièces en fonte).

Nous ne ferons également qu'évoquer le cas des recuits ou revenus d'adoucissement localisés à des zones sensibles de pièces.

1.2 Panorama des procédés de traitement thermique superficiel

On les distingue généralement par la nature de la source thermique mise en jeu, sachant que la nécessité d'apport rapide d'énergie thermique pour limiter la diffusion thermique et confiner les effets structuraux impose des puissances surfaciques de l'ordre du kW/cm^2 .

1.2.1 Trempes après chauffage à la flamme (au chalumeau)

Dans ce procédé relativement ancien [1], la surface de la pièce est portée en quelques secondes au-delà de 900°C à l'aide d'un chalumeau ou d'un jeu de brûleurs judicieusement répartis, puis trempée plus ou moins violemment selon l'épaisseur relative chauffée et la trempabilité de l'acier. Suivant le gaz combustible (acétylène, méthane, propane, etc.) et la conception du chalumeau, la puissance surfacique dispensée peut varier typiquement de $0,5$ à $2 \text{ kW}/\text{cm}^2$.

La profondeur durcie peut varier entre un millimètre et la pleine section de la pièce (typiquement jusqu'à 75 mm) selon la durée d'interaction de la flamme et l'efficacité du refroidissement vis-à-vis de la trempabilité de l'acier.

Les différents procédés de tempe à la flamme sont soit de type stationnaire, soit de type au défilé (« de proche en proche ») suivant le déplacement relatif de la pièce et de la flamme.

La figure 1 présente un schéma de principe de la tempe à la flamme d'une pièce de révolution, tandis que la figure 2 correspond à la tempe au défilé d'une surface plane.

1.2.2 Trempes avec chauffage par induction en moyenne ou haute fréquence

Le chauffage par induction MF peut être utilisé pour réaliser des **revenus** sommaires (généralement quelques minutes à des températures inférieures à 300°C) ou des **recuits** (chauffage vers 900°C /refroidissement naturel) sur des parties de pièce à défragiliser, mais l'application dominante de l'induction MF demeure le **durcissement superficiel localisé** [2].

La partie de pièce à traiter est soumise, en statique ou au défilé (figure 3), au champ électromagnétique d'un inducteur alimenté en courant de haute fréquence, typiquement quelques kHz (« moyenne fréquence ») à 400 kHz (« haute fréquence »). Il en résulte des courants surfaciques induits (courants de Foucault) s'opposant à la variation du flux inducteur et échauffant la pièce par effet Joule et conduction thermique.

Le refroidissement accéléré contrôlant la microstructure de la zone à durcir doit intervenir avant que la température de cette dernière ne redescende en dessous de 750°C , le refroidissement naturel n'étant généralement pas suffisant pour les épaisseurs relatives traitées usuelles. On procède généralement à une tempe sous douche d'eau, celle-ci se substituant à l'inducteur (procédé statique) ou opérant juste derrière l'inducteur (procédé au défilé).

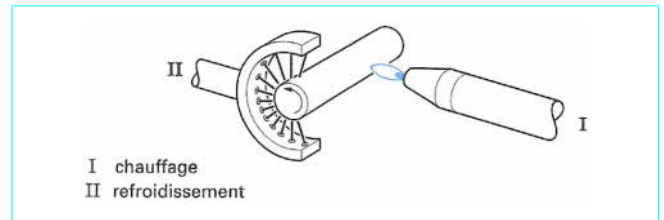


Figure 1 – Tempe générale instantanée d'une surface de révolution (d'après doc. Partiot)

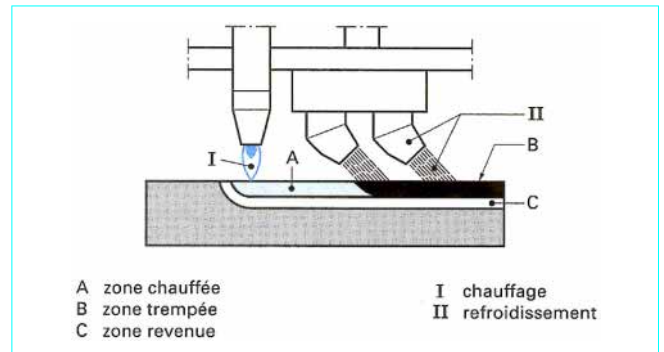


Figure 2 – Tempe au défilé ou de proche en proche (d'après doc. Partiot)

On peut ainsi obtenir des durcissements martensitiques sur des épaisseurs superficielles typiquement comprises entre $0,5$ et 5 mm et des structures intermédiaires assurant la transition entre la dureté de la martensite et celle du substrat.

La **tempe par impulsions** [3] (*pulse hardening* en anglais) est une variante de durcissement localisé après chauffage par induction utilisée pour des dents de scies, alésoirs, ou pièces de précision. Elle met en œuvre des impulsions de 1 à 100 ms en radiofréquence (typiquement 30 MHz) pour affecter des profondeurs de l'ordre du dixième de millimètre.

À l'opposé, côté **basses fréquences**, on utilise aussi le **chauffage par induction**, tant pour des durcissements relativement profonds (champignon de rails miniers, cylindres de laminage à froid...), que pour des traitements en pleine section qui n'ont pas de rapport direct avec nos traitements superficiels (par exemple le frettage thermique de pièces mécaniques).

Nous ne détaillerons plus loin que les procédés de tempe avec chauffage par induction HF ou MF qui sont de loin les traitements thermiques superficiels les plus utilisés dans l'industrie.

1.2.3 Durcissements en phase solide par faisceau laser, faisceau d'électrons, ou torche plasma

On peut chauffer la pièce par interaction directe de la peau avec les photons d'un faisceau laser, les électrons d'un faisceau électronique, ou le plasma d'une torche [44].

Pour réaliser des durcissements localisés par transformation allotropique, on peut alors mettre en œuvre les fortes puissances surfaciques (jusqu'à $10^8 \text{ W}/\text{cm}^2$) permises par ces sources soit en balayant la surface avec un faisceau relativement focalisé, soit en déplaçant avec ou sans recouvrement de petites fenêtres irradiées (inférieures au cm^2).

Il est néanmoins difficile de maîtriser de très fortes densités de puissance compte tenu des instabilités d'interaction et des risques de début de fusion en extrême surface aggravés par l'augmentation du coefficient d'absorption du rayonnement.

À titre d'exemple [4], l'abaque de la figure 4 synthétise les relations entre temps d'interaction, puissance surfacique effective et profondeur durcie, dans le cas particulier d'une source circulaire uniforme irradiant une plaque d'acier. On constate que, pour de courtes interactions de la source conduisant à une profondeur austénitisable de 0,5 mm, le risque de fusion superficielle limite les puissances surfaciques effectives à des valeurs comparables à celles de l'induction.

Après passage du faisceau, les quelques dixièmes de millimètre austénitisés refroidissent rapidement par conduction vers le cœur de pièce resté froid, conduisant généralement à une *autotrempe* martensitique.

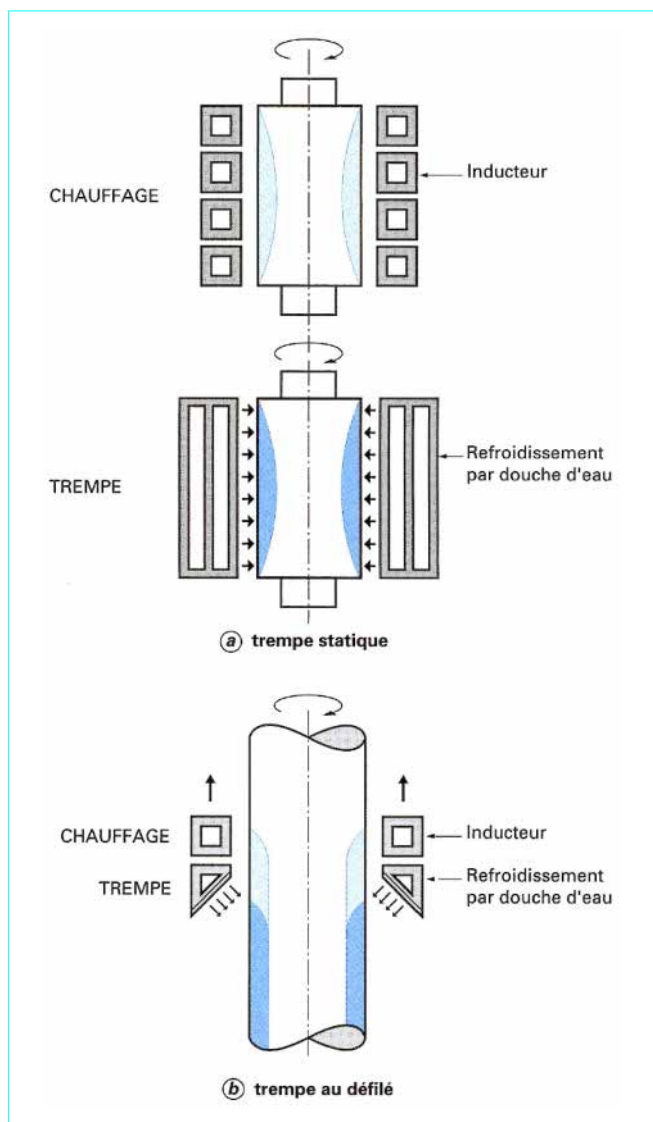


Figure 3 - Schéma de principe d'une trempe statique ou au défilé

■ En ce qui concerne l'utilisation d'un faisceau laser, on peut utiliser une source continue à laser gazeux CO₂, ou un laser solide Nd-YAG. Dans le premier cas (longueur d'onde du rayonnement : 10,6 μm), on doit enduire la surface à traiter (phosphatation, *spray* de graphite, peinture) pour améliorer l'absorption et donc le faible rendement de l'interaction, tandis que la plus faible longueur d'onde du laser YAG (1,06 μm) permet d'éviter le revêtement et autorise des transferts de puissance flexibles par fibre optique.

L'abaque de la figure 5 permet de comparer, d'après [4], les relations entre profondeur traitée et temps d'interaction pour un laser CO₂ de 1,5 kW et un laser YAG de 1,2 kW opérant sur 25 mm² d'acier 42 CrMo 4 poli ou revêtu.

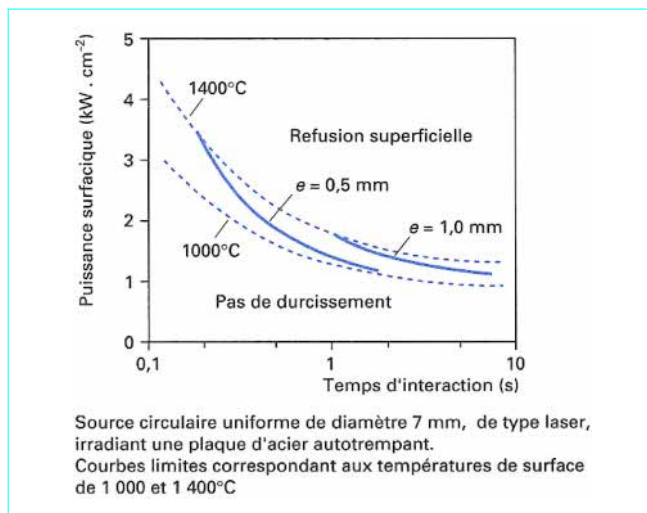


Figure 4 - Relations entre temps d'interaction, puissance et profondeur (e) austénitisable calculées (d'après [4])

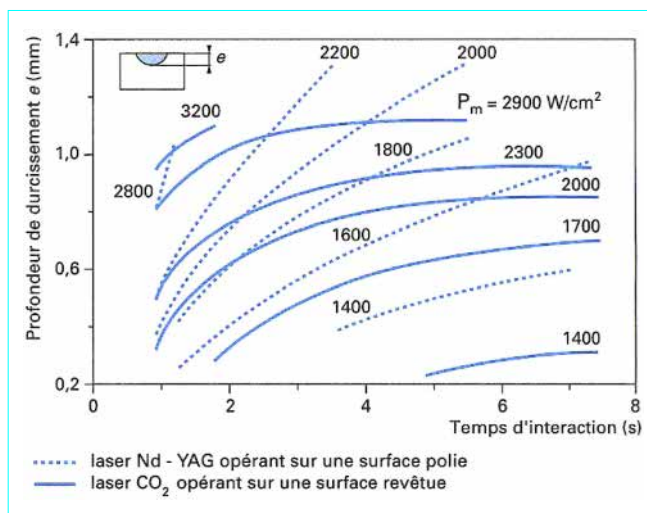


Figure 5 - Abaques puissance surfacique moyenne délivrée - durée moyenne d'interaction - profondeur de durcissement sur une plaque en acier 42 Cr Mo 4 [4]

Outre l'avantage de zones affectées thermiquement plus réduites, le traitement laser présente sur l'induction l'avantage d'autoriser une dureté plus forte liée à une structure plus fine. En revanche, les surfaces relativement étendues ne peuvent être traitées que par recouvrement de pistes durcies relativement étroites (typiquement, 40 mm pour une source CO₂ de 25 kW et 7 mm pour 1,5 kW), ce qui cause souvent des zones adoucies par revenu présentant des contraintes résiduelles défavorables de traction. Le recouvrement d'une surface étendue par des arrangements judicieux de plages millimétriques disjointes durcies par impulsions est une voie intéressante de progrès.

■ **Le durcissement par faisceau d'électrons (FE)**, désigné également par l'expression bombardement électronique (BE), est comparable au durcissement par laser [5] [6], mais avec un meilleur rendement d'interaction (jusqu'à 90 %).

Les faisceaux d'électrons peuvent être facilement mis en forme et défléchis à haute fréquence (balayage ponctuel, linéaire, ou surfacique) par voie électromagnétique pilotée par ordinateur, ce qui permet de mieux distribuer les fortes densités d'énergie. Ils peuvent mobiliser des puissances élevées (plusieurs centaines de kW), ce qui autorise le traitement de larges surfaces en un seul balayage.

La nécessité d'opérer sous vide (< 0,1 Pa) peut exiger des surfaces particulièrement propres, mais, en contrepartie, la qualité des surfaces traitées permet d'éviter des opérations de finition.

À noter l'incompatibilité de ce type de source avec l'injection de poudres du fait de l'électrisation et de la répulsion mutuelle de ces dernières.

■ **Les torches à plasma à arc transféré (PTA)**, utilisées couramment pour des rechargements avec refusion, permettent également des durcissements superficiels de pièces en fonte ou en acier sans atteindre la fusion superficielle car il est possible de moduler la densité de puissance distribuée par la colonne plasma en jouant sur la distance frontale de la pièce [40].

La pièce à traiter est portée à un potentiel positif par rapport à la cathode de la torche : le jet de plasma est alors entièrement parcouru par le courant torche-pièce constituant ainsi une résistance de transfert faible et modulable de l'énergie électrique. La très forte densité d'énergie de la colonne plasma autorise, en fonction des paramètres courant et tension, de contrôler la profondeur traitée entre 0,5 et 10 mm.

Le dessin de la torche a une influence primordiale sur sa durée de vie. En utilisation continue, la puissance des torches actuellement commercialisées dépasse 100 kW (300 A-35 V), avec une durée de vie de cathode d'environ 8 h entre chaque remise en forme.

On peut également utiliser, pour les chauffages relativement plus profonds et grossiers, des torches plasma à arc soufflé où le jet de plasma sortant de la tuyère lèche directement la pièce, mais le réglage de la distance frontale est alors plus critique.

Le faible coût des torches PTA et les larges facilités d'automatisation et de robotisation de leur déplacement devraient bien situer ces installations pour des moyennes séries de pièces exigeant moins de précision de traitement que celles intéressées par le laser ou le faisceau d'électrons.

1.2.4 Traitements de refusion superficielle sans apport de matière

Ce type de traitement intéresse surtout les **pièces mécaniques en fonte**, tels les arbres à cames, pour lesquelles on recherche une amélioration de la tenue à l'usure-frottement et à l'écaillage en transformant après refusion superficielle la fonte grise perlitique en fonte blanche plus dure (typiquement 700 HV au lieu de 220 HV).

La refusion superficielle peut être réalisée par déplacement relatif d'une fenêtre irradiée ou par oscillation axiale du faisceau énergétique focalisé sur la pièce en rotation : les vitesses d'oscillation et de rotation sont adaptées aux profondeurs à fondre ainsi qu'aux nécessaires recouvrements des cordons fondus. Après passage du

bain liquide, la peau se resolidifie très rapidement en formant une microstructure très fine ayant généralement une bonne résistance à l'usure et à la corrosion.

Les sources utilisées peuvent être soit une torche de soudage TIG ou une torche plasma pour des profondeurs refondues de l'ordre du millimètre (oscillation de faisceau focalisé), soit une source laser [7] pour des profondeurs refondues de quelques dixièmes de millimètre sur des plages très précises (déplacement de fenêtre irradiée). Dans ce dernier cas, la surface traitée sous gaz protecteur peut rester géométriquement satisfaisante et éviter l'usinage de finition.

La refusion superficielle sans apport d'éléments d'alliage présente aussi de l'intérêt pour les aciers moulés (nuances hypereutectiques pour outils) ou frittés fortement alliés pour lesquels on recherche une amélioration locale des propriétés par affinement de structure, présence de constituants hors équilibre, ou réduction des porosités.

Dans un domaine encore industriellement limité, on peut enfin mentionner la possibilité d'**amorphisation superficielle** ou **glaçage** (*surface glazing*) de certains alliages ferreux dopés par un élément non métallique (B, P...). De telles structures ne peuvent être obtenues que lors de chauffages impulsifs et de refroidissements extrêmement rapides sur de très faibles épaisseurs refondues. On peut obtenir ainsi des verres métalliques aux propriétés physiques et tribologiques remarquables.

1.2.5 Traitements de refusion superficielle avec apport de matière

Nous ne rappellerons que pour les situer **hors thème** les trois types d'amélioration des caractéristiques de surface par apports dans les lits de refusion superficielle sous torche plasma ou faisceau laser.

■ **Alliage de surface** par apport d'éléments métalliques soit par injection de poudre, soit par dépôt préalable (électrodéposition, peinture, poudre dans liant).

On peut ainsi obtenir, avec un coût minimal d'éléments d'alliage, une peau enrichie, mieux adaptée aux conditions d'usure et de corrosion de la pièce.

■ **Recouvrement (cladding) du substrat** par une nouvelle phase avec liaison métallique peu épaisse pour ne pas polluer par dilution la composition du revêtement. On peut procéder soit par dépôt préalable des constituants de la couche, soit par projection de poudre (directement dans le bain liquide ou en avant du spot laser ou plasma). Cette poudre peut être un alliage (comme les stellites qui sont des alliages de cobalt à 30 % Cr, 10 % W, 0,1 à 3 % C utilisés pour les têtes de soupapes) ou un mélange de carbures (chrome, molybdène...).

On peut ainsi améliorer considérablement la tenue à l'usure, favoriser des comportements tribologiques (additions variées de vanadium, tungstène, ou titane...), ou encore améliorer la tenue à la corrosion (revêtement de composition inoxydable).

■ **Dispersion** dans la couche superficielle refondue **de particules** (40 à 200 μm) dures et réfractaires : TiC, WC, SiC, Al₂O₃, ZrO₂, borures...

Ces enrichissements ou rechargements ne constituant pas des procédés purement thermiques, ne seront pas détaillés dans la suite de cet article.

1.3 Poids industriel relatif des procédés envisagés

Il existe bien entendu des critères technico-économiques de base pour orienter une application vers tel ou tel procédé. On trouvera, à titre d'exemple, dans le tableau 1, une base de choix sommaire proposée par le CETIM [8] et complétée par Renault.

Tableau 1 – Exemples de choix d'un procédé de traitement thermique superficiel

Critère	Procédés					
	Chalumeau	Induction	Impulsions	Laser	Bombardement électronique	Plasma
Taille des séries	Petites séries de grosses pièces	Importante à très importante	Moyenne à grande	Très importante	Très importante	Moyenne à grande
Épaisseur de traitement	> 1 mm	> 0,5 mm	≈ 0,01 mm	0,01 à 0,3 mm	0,01 à 0,3 mm	De 0,1 mm à plusieurs mm
Taille des pièces	Particulièrement adapté aux grosses pièces	Quelques mm à plusieurs m	Pièces pointues, à bords tranchants, de petites dimensions	Pas de limitation	Pièces petites à moyennes	Pièces généralement de petites dimensions
Investissement	Relativement faible	Générateur : 0,5 MF/100 kW Installation : 3 à 10 fois plus	Élevé	Très élevé : se chiffre en MF	Très élevé	Moyen à élevé suivant la technologie de la torche

Nous allons citer quelques-unes des applications industrielles importantes de ces différents procédés pour en situer l'importance relative.

1.3.1 Régression de la trempe avec chauffage à la flamme

Elle est encore utilisée pour les durcissements de pièces de grandes dimensions (bâts de machines-outils, glissières, outils d'emboutissage, cylindres de laminoirs, gros engrenages, etc.) ou pour reprendre sommairement le durcissement de pièces d'usure rapide et aléatoire tels les outils d'engins de travaux publics. On peut trouver des équipements automatisés permettant de traiter, des ronds allant jusqu'à 1,5 m de diamètre ou encore des plaques réchauffées sur 1,5 m de large en monopasse.

Compte tenu des risques de décarburation superficielle et de brûlure par surchauffe, ce procédé a été remplacé par la trempe par induction pour les pièces pas trop grosses. La plupart des considérations thermiques et métallurgiques que nous développerons à propos de la trempe superficielle après chauffage par induction sont transposables à la trempe après chauffage à la flamme.

1.3.2 Essor de la trempe superficielle avec chauffage par induction

On peut ainsi schématiser les trois étapes de l'essor du procédé, industrialisé pour la première fois en 1936 par la société TOCCO aux États-Unis.

■ **Jusque vers 1960**, n'ont été traitées que des pièces au profil simple – du type arbre lisse sans épaulement – autorisant des chauffages en statique ou au défilé avec des géométries simples d'inducteur. En MF, on ne disposait encore que de groupes tournants encombrants et bruyants, à fréquence fixe. En HF, on utilisait des générateurs à triodes issus des techniques de télécommunication, avec des rendements inférieurs à 70 %.

La clientèle se dessine alors : grands constructeurs mécaniciens intégrés (automobile/poids lourd), machinisme agricole, matériel de travaux publics, machine-outil), sous-traitants de la mécanique, traitements thermiques à façon...

■ **De 1960 à 1980**, on assiste à la fiabilisation des systèmes, à une automatisation poussée des machines de présentation gagnées à la commande numérique et à l'élargissement de l'éventail d'applications. Cette période connaît l'avènement de l'onduleur à thyristor en MF, et du générateur aperiodique en HF, d'où des générateurs compacts, aux rendements nettement améliorés.

■ **Depuis 1980**, on note surtout l'essor de l'onduleur à transistors qui couvre aujourd'hui pratiquement toute la gamme utile des fréquences et des puissances avec des rendements supérieurs à 90 % à puissance nominale.

On assiste parallèlement au contrôle systématique des paramètres de *process* et à l'émergence d'applications plus pointues concurrençant la cémentation.

Globalement, il y aurait actuellement en France plus d'un millier d'équipements de durcissement superficiel par induction (puissance installée 250 MW-75 % en moyenne fréquence).

À titre d'exemple, **dans le secteur automobile**, le durcissement par induction concerne une cinquantaine de pièces par véhicule parmi lesquelles on peut citer :

- **pour les moteurs** : tourillons, manetons et portée de joint de vilebrequins en fonte ou acier ; cames et portées de joint d'arbres à cames en fonte ou acier ; queues de soupapes ; axes de culbuteurs et de pistons ; couronnes de démarreur ; poussoirs... ;
- **pour les transmissions** : axes de fourchettes et fourchettes ; joints de transmission ; arbres-relais, arbres-tulipes ; certains pignons... ;
- **pour les liaisons-sol** : fusées, moyeux, rotules, barres de torsion, crémaillères de direction...

Les parcs machines des traitements par induction des constructeurs automobiles représentent globalement une puissance installée comparable à celle des traitements thermochimiques (10 MW chez Renault), avec certains générateurs de plus de 300 kW, et des cadences journalières de traitement d'une seule installation pouvant se chiffrer en milliers de pièces.

Deux **exemples** pour se faire une idée des investissements.

— Le coût d'un générateur de 100 kW est, en 1995, de l'ordre de 500 kF, mais celui de toute l'installation qu'il alimente peut être de 3 à 10 fois supérieur, suivant le degré d'automatisation et de précision des transferts, présentations et contrôles de pièces. C'est ainsi qu'une installation complète de traitement de vilebrequins d'automobile en fonte à la cadence de 100 pièces/h peut avoisiner 10 MF.

— À titre d'autre exemple, l'installation de traitement des bols-fusées (axes de roue) de l'usine Renault du Mans permet sur deux machines à plateau tournant de six postes de réaliser le durcissement superficiel de 500 pièces par heure avec 190 kW-8 kHz, pour un coût total de 5 MF. Un même inducteur, avec différents concentrateurs de champ magnétique, autorise le durcissement des cannelures de la fusée sur 2 mm de profondeur, le congé de raccordement sur 1 mm, et le plateau de base sur 3 mm. Grâce à deux autres postes en parallèle, on réalise les revenus en ligne avec une température maximale de surface de 300 °C.

1.3.3 Traitements avec laser, faisceau d'électrons, ou torche plasma

En 1995, les installations de durcissement superficiel par **laser** ne se comptent encore que par dizaines dans toute l'industrie automobile alors que l'ensemble des sources lasers utilisées dans l'industrie est de l'ordre du millier [9].

Les lasers YAG de puissances nominales 1 à 2 kW deviennent de sérieux concurrents aux sources continues CO₂ de 5 à 10 kW, aux faibles rendements de chauffage et relativement onéreuses (typiquement, en 1995, 1 500 kF pour 5 kW de puissance utile).

Au titre des réalisations actuelles, on peut citer :

- le traitement anti-usure des fûts de carter-cylindre en fonte chez le constructeur automobile japonais Mitsubishi, par touches de durcissement (quelques millimètres carrés sur 0,3 mm de profondeur) régulièrement distribuées sur la hauteur utile du fût ;
- le durcissement de génératrices distribuées sur la périphérie de boîtiers de crémaillère de direction en fonte chez General Motors-Saginaw [10] ;
- le durcissement des paliers et manetons de vilebrequins en acier ou fonte GS ;
- le durcissement de cames en fonte GS sans, ou avec, refusion superficielle.

Les traitements industriels de refusion superficielle par **faisceau d'électrons** ou **torche plasma** ne sont guère plus répandus que les traitements sous faisceau laser. À titre d'exemple, on peut citer la commande en 1994, par le constructeur automobile AUDI, d'une installation à 2 lignes parallèles de 1 000 pièces par jour pour la refusion superficielle par faisceau d'électrons des cames d'arbres à cames en fonte grise (coût de l'ordre de 10 MF).

On peut s'attendre à un développement industriel plus rapide des techniques faisant appel au **revêtement** ou **rechargement sous faisceau laser**. On peut citer notamment le revêtement des zones de fixation des ailettes de turbine aéronautique [11], ou le revêtement des surfaces d'appui des soupapes par des alliages de type stellite [12]. Cette technique de stellitage des soupapes est d'ailleurs déjà couramment pratiquée par Toyota [13].

1.4 Atouts et handicaps de ces procédés

■ Globalement, les **principaux atouts** des trempes superficielles après chauffage, par induction, laser ou FE peuvent être ainsi résumés :

- intervenant aux derniers stades de réalisation des pièces, elles n'affectent pas les conditions et les coûts de mise en forme ;
- en règle générale, elles apportent, souplesse, disponibilité liée à la faible inertie, prédisposition à l'automatisation, économie d'énergie et d'éléments d'alliage ;
- elles limitent les déformations due au confinement du chauffage et de la transformation structurale ;
- ces traitements sont peu polluants et à durées de cycle réduites, comparables à celles des cycles d'usinage, ce qui autorise leur intégration en ligne d'usinage ;
- robustesse des générateurs et possibilité de réutilisation ;
- pour l'induction, facilité de mise en œuvre de puissances élevées (quelques centaines de kW) avec des investissements modérés ;
- pour l'induction, contrairement au laser, création de chaleur au sein même du métal, donc sans nécessité de préparation de surface, et sur des aires suffisantes pour éviter les recouvrements ;
- possibilités de densités de puissance adaptées à la transformation de la peau, sous quelques millimètres pour l'induction, quelques dixièmes de millimètre pour le laser, avec de faibles dégradations de surface ne nécessitant pas de finitions et autorisant des reprises de traitement.

■ Au titre des **handicaps**, on peut citer :

- la difficulté d'adaptation de l'inducteur dans le cas de surfaces complexes à traiter avec différentes spécifications d'épaisseur ;
- la sévérité du contrôle de *process* à prévoir pour les traitements pièce à pièce à grande cadence, notamment avec laser ou FE ;
- pour les sources focalisées telles que laser ou FE, l'adoucissement inévitable des bandes latérales de recouvrement lorsque l'on traite des surfaces importantes par balayage, la fiabilité de fonctionnement à démontrer en milieu industriel, et les investissements encore élevés (de l'ordre du MF par kW installé) ;
- pour les sources à FE, et plus particulièrement aux fortes cadences, les sujétions de mise sous vide fréquentes.

2. Potentialités de ces traitements en termes de tenue mécanique

Ce type de traitement permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées en surface au niveau des plages fonctionnelles critiques, tout en conservant à cœur une ductilité qui assure la sécurité du fonctionnement de la pièce [14]. On peut ainsi accroître les performances des pièces sollicitées, principalement au voisinage de la surface : résistance à la fatigue – notamment en sollicitations répétées non uniformes en flexion, et (ou) torsion –, résistance à la fatigue de surface (écaillage), et résistance à l'usure abrasive.

En fatigue, ce sont les fibres externes de la pièce pour la torsion ou les fonds de congés pour la flexion qui sont souvent les plus sollicités. En plus du renforcement structural retardant l'initiation des fissures, le gonflement martensitique superficiel accompagnant le durcissement de ces fibres se traduit naturellement par l'établissement de contraintes de compression qui s'opposent aux sollicitations normales de travail de la pièce [15].

L'augmentation de la tenue à l'usure abrasive n'est souvent qu'une conséquence du durcissement nécessaire à l'accroissement de tenue en fatigue, mais l'argument peut être parfois prioritaire : cames, portées de joint de pièces rotatives, cylindres de laminoir à froid...

2.1 Amélioration de la résistance à la fatigue

Cette amélioration dépend de l'évolution sous la surface de la microstructure et des contraintes résiduelles, donc en particulier de l'épaisseur de traitement. Des gains de limite d'endurance jusqu'à 30 % ont été enregistrés lors d'essais en flexion rotative sur éprouvettes entaillées en XC 42 trempé et revenu pour 1 000 MPa [14]. La limite d'endurance en fatigue augmente avec l'épaisseur traitée jusqu'à un maximum (figure 6). Le niveau atteint est fonction du rapport entre le diamètre de la zone non durcie et le diamètre global.

D'après [16], et pour des sollicitations en flexion rotative, ce maximum apparaît pour un rapport de 0,6 en trempe au défilé et de 0,4 en trempe statique. Pour ce dernier mode de trempe, divers auteurs ont effectivement constaté une résistance supérieure.

On trouvera à la figure 7 un certain nombre de résultats comparatifs de fatigue établis par [17] sur **éprouvettes lisses de flexion rotative** Schenck. La comparaison a concerné, d'une part, des éprouvettes en différentes nuances de type CrMo 4 ou MnCr 5 (encore couramment désignées par CD 4 et MC 5 dans l'industrie automobile) cémentées ou carbonitrurées avec une profondeur conventionnelle de 0,4 mm et, d'autre part, des éprouvettes XC 42, 42 C 2 ou 42 B 3, initialement recuites ou trempées – revenues puis traitées par induction à 1 mm d'épaisseur conventionnelle, et enfin éventuellement revenues à 230 °C. Dans les meilleurs des cas, l'induction peut conduire à des résultats comparables à la carbonituration.

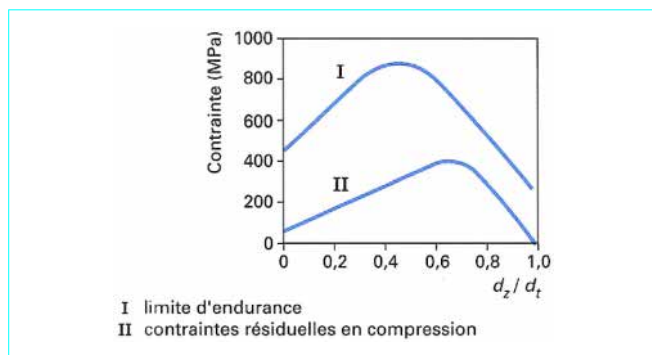


Figure 6 - Limite d'endurance et contraintes résiduelles en compression en fonction du rapport entre le diamètre de la zone non durcie d_2 et le diamètre global d_t (d'après [16])

Traitement	Nombre de nuances	Essais	Moyenne des limites de fatigue (MPa)	
Carbonituration	11	40	915	
Cémentation	10	23	840	
État initial recuit :	sans revenu	4	7	720
	revenu 230°C	4	7	706
État initial trempé revenu :	sans revenu	5	9	980
	revenu 230°C	5	8	890

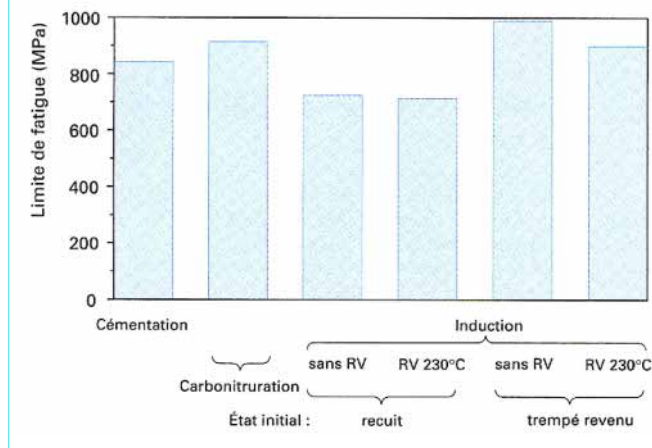
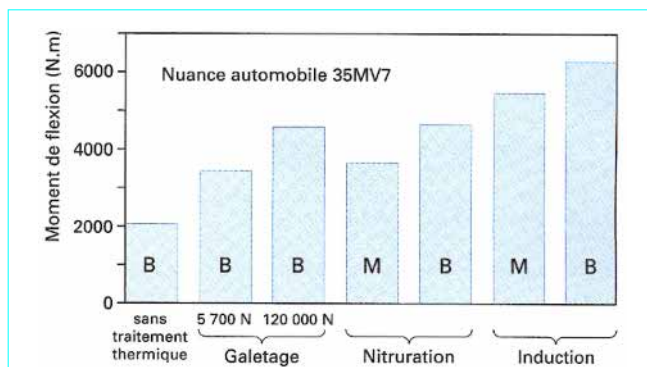


Figure 7 - Comparaison de limites de fatigue sur éprouvettes lisses de flexion rotative (d'après [17])

La figure 8 illustre d'après [17] l'intérêt d'un durcissement par induction de congés de raccordement sur des pièces mécaniques de géométrie plus complexe tels les vilebrequins de moteurs pour l'automobile. On sait que ces derniers ont leurs points faibles dans les rayons de raccordement des manetons et des paliers avec les flasques des masses d'équilibrage. Les techniques largement répandues de renforcement pour les vilebrequins en acier sont le galetage et la nitruration, mais les moins sollicités se contentent d'une rectification sur un état trempé par induction des paliers et manetons. Le tableau comparatif de la figure 8 montre que le renforcement par induction des gorges et congés de raccordement permet de tripler la limite de fatigue par rapport à l'état initial et d'apporter un gain notable par rapport aux autres solutions.



Nuance	Traitement	Structure (1)	Moment de flexion N.m	Limite de fatigue MPa
35MV7	Sans	B	2 052	425
	Galetage 5 700 N 120 000 N	B	3 434	-
		B	4 570	-
	Nitruration	M	3 620	765
		B	4 660	980
Induction	M	5 492	1422	
	B	6 298	-	
Fonte GS	Galetage	F + P	3 380	873
	Nitruration	B	2 812	596
	Induction	F + P	-	890

(1) B : bainitique ; F + P : ferrito-perlitique ; M : martensitique

Figure 8 - Amélioration des caractéristiques mécaniques de vilebrequins par durcissement des congés (d'après [17])

Plus précisément [17], des comparaisons de limite de fatigue en flexion alternée sur machine Baldwin ont été réalisées sur des vilebrequins en acier bainitique 35 MV 7. Ont été comparés des lots de vilebrequins identiques forgés :

- non traités (raccordements à rayon tangent) ;
- avec nitruration ionique 4 heures à 540 °C (enrichissement 0,2 mm ; contrainte résiduelle surfacique de compression de 650 MPa) ;
- avec galetage sectoriel sévère (1 000 daN sur paliers/500 à 1 000 daN sur manetons) ;
- avec traitement par induction (2,5 mm de profondeur conventionnelle) des portées avec les mêmes gorges de raccordement que les pièces galetées.

Les résultats d'endurance à 2 millions de cycles, exprimés en moment de flexion, pour ces quatre cas sont comparés dans le tableau 2.

Traitement	Raccordement	Moment de flexion (N · m)
Pas de traitement	Rayon tangent	919
Nitruration	Rayon tangent	1 417
Galetage sectoriel	Gorge 1,65 mm	2 582
Trempe par induction	Gorge 1,65 mm	3 058

Ces résultats confirment ceux obtenus sur éprouvettes ainsi que l'intérêt de la trempe par induction, plus économique (le durcissement des portées reste nécessaire dans le cas du galetage).

De façon générale, au voisinage de la limite d'endurance, l'effet d'un traitement superficiel (induction, laser ou FE en monopasse) est de réduire la vitesse de fissuration et le seuil de non fissuration [21]. Cela peut être rattaché aux contraintes résiduelles de compression formées en peau de pièce et aux effets d'entaille des petites fissures préexistantes émoussées par le traitement.

Dans le cas des engrenages, on préconise pour les sollicitations en pied de dent une profondeur optimale de trempe égale à $0,2$ à $0,4 m$, où m est le module de la denture [18]. Le gain en limite d'endurance s'accompagne généralement d'une diminution de ténacité si on ne procède pas à un revenu complémentaire vers 180°C .

On trouvera à la figure 9 une comparaison très générale des niveaux usuels de durées de vie en fatigue de flexion des zones en pied de dent d'engrenages automobiles en différentes nuances traitées suivant les principaux types de traitements [19] : on y remarquera la relative bonne position des durcissements superficiels par induction.

En ce qui concerne la tenue aux chocs, des traitements de contour par induction sur des couronnes de pont de boîtes de vitesses automobiles de module voisin de 2 en acier 45 M 5 permettent d'atteindre – après un revenu complémentaire à 180°C – des énergies de rupture en choc interdenture doubles de celles obtenues sur pièces de référence en 27 MC 5 carbonitruré [17].

2.2 Résistance aux sollicitations de surface

En fatigue de surface (écaillage ou *pitting*), on notera l'absence de données bibliographiques précises, mais on peut sans doute conserver la règle, valable en cémentation, selon laquelle la profondeur conventionnelle de durcissement doit être supérieure à deux fois la profondeur où les calculs élastiques de Hertz situent le cisaillement maximal [45].

On trouvera à la figure 10 une comparaison globale des niveaux usuels de tenue en fatigue de surface obtenus [19] sur de la pignonnerie automobile pour différents types de traitements : le durcissement par induction permet des limites de tenue à l'écaillage de 1 300 à 1 400 MPa.

2.3 Contribution des contraintes résiduelles en surface

On peut facilement montrer [44] que, s'il n'y a pas transformation de phase, les contraintes résiduelles dans les couches superficielles d'un cylindre cyclé thermiquement à partir de sa surface sont soit nulles (pas de dépassement de la limite d'élasticité en compression au chauffage), soit de traction.

S'il y a austénitisation de la peau au chauffage, on obtient naturellement des contraintes résiduelles de compression en surface, ces contraintes résultent surtout de la dilatation volumique relative (environ 10^{-3} , soit l'équivalent de plusieurs centaines de degrés d'échauffement banal) liée à la transformation martensitique finale de la couche superficielle bridée par continuité sur le métal sous-jacent non transformé.

La figure 11 montre, pour le traitement par induction d'une crémaillère de direction [17], la distribution des contraintes résiduelles développées dans deux cas types (XC 38 recuit et 37 C 4 trempé-revenu), et la possibilité d'atteindre des niveaux très élevés en surface.

À chaque sollicitation de la pièce, il y a des points critiques près de la peau où le tenseur réduit, somme des contraintes extérieures et résiduelles, permet éventuellement d'atteindre un seuil de fissuration en fatigue selon certains critères. Le critère généralement admis consiste à borner le domaine de non-fissuration par des droites cission maximale/tension hydrostatique, de pente négative, déduites d'essais simplifiés types. On voit ainsi tout l'intérêt de fortes compressions hydrostatiques dans les zones critiques.

La répartition des contraintes résiduelles entre zone trempée et zone non trempée dépend, pour une géométrie de pièce et une profondeur durcie données, des cycles thermiques et des séquences de transformation développés au voisinage de la surface [15]. Elle n'est notamment pas la même pour les modes de trempe en statique et au défilé [20], et le niveau de compression en peau peut être réduit par un arrêt prématuré de la trempe ou une dilatation différentielle du cœur.

La relaxation des contraintes résiduelles peut intervenir juste avant la limite d'endurance. Dans le cas d'une sollicitation uniaxiale en fatigue, cette relaxation opère surtout dans la direction de sollicitation, et les contraintes résiduelles sont plus stables pour les plus fortes épaisseurs traitées.

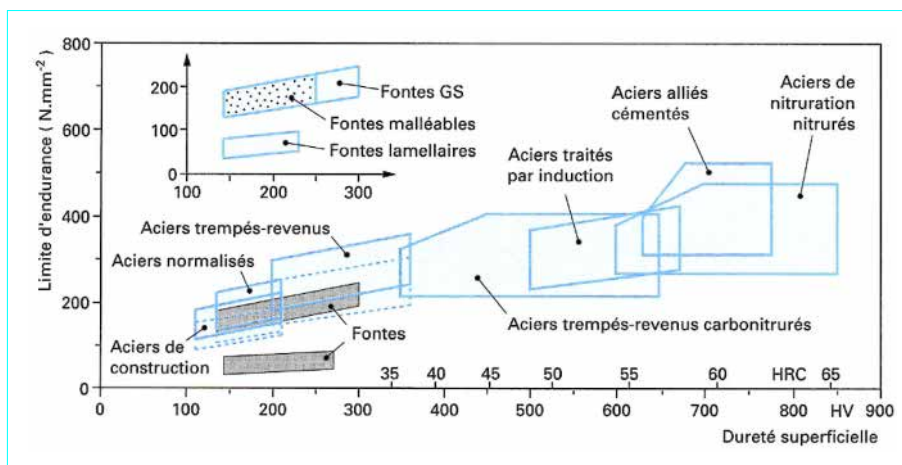


Figure 9 – Comparaison des durées de vie en fatigue de la zone en pied de dent d'engrenages automobiles en différentes nuances, traités suivant différents procédés (d'après [19])

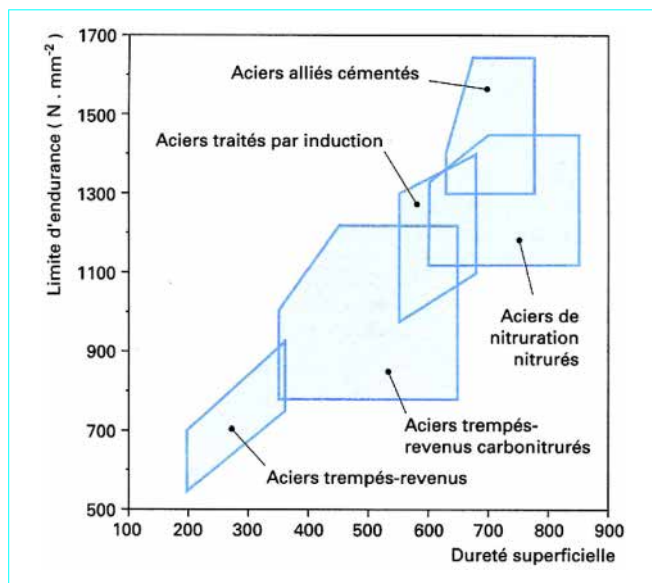


Figure 10 – Comparaison des durées de vie en fatigue de surfaces de dents d'engrenages automobiles en différentes nuances, traitées suivant différents procédés (d'après [19])

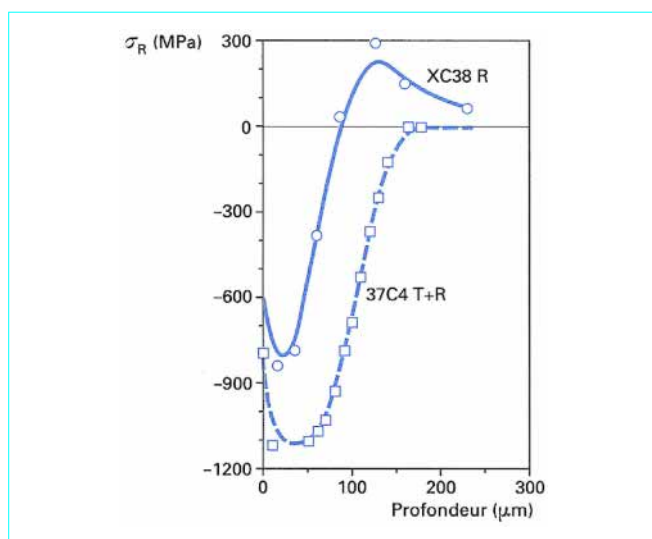


Figure 11 – Distribution des contraintes résiduelles superficielles σ_R développées dans une crémaillère de direction en acier XC38 recuit ou en acier 37C4 trempé-revenu (d'après [17])

2.4 Synthèse comparative

L'exemple précité de l'amélioration de la durée de vie des vilebrequins en travaillant la géométrie et le durcissement des congés de raccordement illustre bien la difficulté des comparaisons entre familles de traitements.

Très souvent cependant, l'amélioration de la tenue en fatigue ou à usure par abrasion de pièces mécaniques en acier met en compétition la trempe dans la masse d'aciers alliés, la cémentation, la

carbonituration ou la nitruration de nuances spécifiques, la trempe martensitique superficielle et localisée de nuances peu alliées à plus de 0,3 % en masse de carbone.

L'épaisseur de traitement constitue un sujet de controverse lors de la comparaison des résultats, mais n'est évidemment pas comparable pour ces traitements (plutôt : 0,1 à 0,4 mm pour la nitruration, 0,3 à 0,6 mm pour la carbonituration, 0,5 à 1,5 mm pour la cémentation et 1 à 2 mm pour l'induction).

La trempe dans la masse ne permet pas d'obtenir de très bonnes qualités de la couche superficielle (risques de décarburation, contraintes résiduelles de traction) et doit concéder le surcoût de nuances relativement trempantes pour les pièces un peu massives.

La cémentation ou la carbonituration permettent d'obtenir sur des nuances spécifiques de très bonnes propriétés de surface et à cœur, mais au prix de traitements de plusieurs heures et de risques de déformations géométriques.

La nitruration peut donner d'excellents durcissements anti-usure de la surface, sans risques de déformations, mais les profondeurs durcies au bout de quelques heures sont insuffisantes pour garantir des tenues en fatigue de surface avec des maximums de cisaillement de Hertz assez profonds.

Finalement, les durcissements localisés avec chauffage par induction peuvent représenter pour de nombreuses applications le meilleur compromis au plan métallurgique et économique.

Au plan **métallurgique**, la maîtrise des profils de dureté, des contraintes résiduelles de surface et des déformations, ainsi que la suppression des retouches ultérieures, font souvent oublier les meilleures propriétés intrinsèques en fatigue permises par cémentation.

Pour certaines pièces massives ou de grande série, le **gain d'exploitation** peut déjà résulter du moindre coût des produits bruts utilisés (aciers peu alliés faciles à mettre en forme) et des très faibles taux de rebuts liés à des installations automatisées.

Le tableau 3 donne, à titre d'exemple, un bilan économique comparé entre traitement pleine section et traitement superficiel par induction pour un moyeu de roue [34] :

Tableau 3 – Bilans économiques de traitements thermiques pleine section et par induction		
Poste de la gamme	Traitement thermique pleine section	Traitement thermique par induction
Matière + forge	37 C4 : 19,5 F 37 MB 5 : 18 F	XC 42 : 16,5 F
Traitement thermique sur brut	Trempe + revenu : 2 F	Recuit PL : 1 F
Usinage	Forage + tournage + brochage + perçage = 21 F	Recuit PL : 1 F = 18,5 F
Traitement thermique sur pièce	Sans : 0	Trempe HF fût et congé : 2 F
Coût global	41 à 44 F	38 F (- 7 à 14 %)
PL recuit en perlite lamellaire		

En ce qui concerne les éventuels besoins de **reprise d'usage** après traitement, ils sont à la mesure de l'épaisseur de la couche décarburee en fin de chauffage. Typiquement, au bout d'un temps t (s) à la température T (K), l'épaisseur décarburee de 10 % est, en mm, de l'ordre de : $0,5\sqrt{t} \exp(-8\,140/T)$, ce qui donne une

quinzaine de micromètres pour un maintien équivalent de 5 s vers 950 °C. Cet exemple montre bien que les besoins de rectification pour ôter les couches affectées par la décarburation après traitement rapide de surface sont très limités par rapport aux autres familles de traitement.

Enfin, en cas de traitement incorrect, les faibles perturbations géométriques et analytiques de la surface permettent de réitérer le traitement avec pratiquement les mêmes paramètres de réglage, ce qui est à proscrire pour les traitements thermochimiques.

3. Limitations thermiques et métallurgiques de ce type de traitement

Pour obtenir simultanément dans les zones traitées, les profils désirés de duretés, microstructures, et contraintes résiduelles, il faut pouvoir prévoir, d'une part, les cycles thermiques en fonction de la puissance surfacique, du temps de chauffage et de la sévérité de trempe et, d'autre part, les conséquences structurales de ces cycles en fonction de la trempabilité de l'acier utilisé.

3.1 Limites imposées par la thermique du chauffage

3.1.1 Chauffage par induction

Plaçons une pièce d'acier dans un champ électromagnétique de fréquence f . La répartition des courants induits et l'énergie dissipée dans la pièce peuvent être déterminées à partir des classiques équations de Maxwell, tandis que la résolution des non moins classiques équations de Fourier permet de connaître la distribution des températures dans la pièce, au chauffage, comme lors de la trempe ultérieure.

Ces résolutions sont actuellement à la portée de nombreux logiciels (SYSTUS, FLUX 2D, PHI 3D, etc.), mais des difficultés subsistent quant à la prise en compte des conditions aux limites, des changements de phase, et des variations spatio-temporelles des constantes électromagnétiques et thermiques de la pièce.

Pour se faire **une image simplifiée**, nous supposons en première analyse que la perméabilité relative, $\mu_r = \mu/4\pi \cdot 10^{-7}$, ainsi que la résistivité ρ sont constantes dans la page d'étude.

Les densités de courants induits ont une évolution exponentielle avec la profondeur z sous la surface : $J(z) = J(0) \exp(-z/\rho)$, expression dans laquelle la profondeur conventionnelle de pénétration est $p = 500 (\rho/\mu_r f)^{1/2}$.

L'intégration de J sur la profondeur conduit à l'intensité des courants induits :

$$I = pJ(0)$$

on peut remplacer la distribution réelle de courants induits par une densité uniforme $J(0)$ sur une épaisseur p qui draine 87 % de la puissance dissipée.

Précisons les **ordres de grandeur de la profondeur de pénétration p dans les aciers**.

■ Pour les **phases amagnétiques**, telles la ferrite au-dessus de la température de Curie (environ 770 °C) ou l'austénite, on a $\mu_r = 1$, d'où les valeurs de p vers 800 °C :

f (kHz)	3	10	100	400
p (mm)	10	5	1,5	0,7

■ Pour les **aciers en phase ferritique** en dessous de la température de Curie, donc ferromagnétiques, la perméabilité magnétique relative dépend du champ appliqué. Elle est de l'ordre de 4 à 8 en moyenne fréquence (10 kHz), et de 10 à 18 en HF (300 kHz) pour des champs magnétiques de l'ordre de 10^5 à 10^6 A/m. Dans ces conditions, on trouve pour valeurs de p à 700 °C :

f (kHz)	3	10	100	400
p (mm)	2	1,2	0,35	0,12

On peut montrer que **la puissance est surtout fournie avant la température de Curie**, en envisageant **l'exemple simplifié d'un cylindre** de diamètre D et longueur L placé dans un solénoïde inducteur de diamètre $D' > D$ suffisamment long pour que s'y développe un champ magnétique alternatif uniforme H .

Dans ces conditions, la puissance spécifique fournie (puissance par unité de surface latérale du cylindre) est de la forme :

$$P_s = H^2 \frac{\rho}{p} F \left(\frac{D}{p} \right) C (D/D', D'/L)$$

Le facteur de couplage $C (D/D', D'/L)$ vaut 0,9 pour un bon couplage de l'inducteur, par exemple quand $D/D' = 0,8$ et $D'/L = 0,2$, mais tombe à 0,7 dès que $D/D' = 0,7$ et $D'/L = 0,8$.

Le facteur de fréquence F , quant à lui, croît de 0 à 1 avec D/p et vaut, par exemple, 0,75 pour $D/p = 4$.

La puissance délivrée par unité de volume chauffé, $4\pi \mu H^2 f F \rho/D$, passe par un maximum pour $D/p = 4$.

Le rendement électrique de l'inducteur (construit généralement en cuivre de résistivité $\rho' < \rho$) est de la forme :

$$\eta = \left[1 + \frac{D'}{D} \frac{L'}{L} \frac{1}{F} \left(\frac{\rho'}{\rho \mu_r} \right)^{0,5} \right]^{-1}$$

Son amélioration passe par la condition $D/p > 4$ et par une amélioration du couplage.

De façon générale, **le rendement de transmission énergétique reste voisin de 1 dès lors que la fréquence utilisée est supérieure à la fréquence critique**, c'est-à-dire celle pour laquelle la profondeur de pénétration est de l'ordre du quart de la dimension transversale de la pièce.

La diffusivité thermique $a = \lambda/(\rho c)$ des aciers couramment utilisés en induction varie de 0,13 à 0,055 cm²/s entre la température ambiante et 1 000 °C, et reste voisine de 0,06 cm²/s au-delà de 600 °C.

La puissance volumique (W/m³) induite sous la peau de pièce est de la forme $Q = Q_0 \exp(-2z/p)$.

Elle est équivalente à une densité de flux thermique :

$$P_0 = \int Q dz = \frac{\rho}{2} Q_0$$

La température de peau varie paraboliquement avec la durée τ de chauffage :

$$\theta_s = \lambda^{-1} P_0 (2a\tau)^{0,5} = 0,8 P_0 \sqrt{\tau}$$

où P_0 est exprimé en kW/cm².

Il en résulte que si on limite vers 1 200 °C la température de surface, **la puissance surfacique spécifique nécessaire** (en kW/cm²) peut être reliée à cette durée de chauffage (s) :

$$P_0 \approx 1,5 / \sqrt{\tau}$$

La résolution de l'équation de Fourier pendant le chauffage :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} Q_0 \exp(-2z/p) = 0$$

conduit, dans le cas simplifié où p , a et λ sont considérés constants, où $z < 2(at)^{0,5}$, et où l'évolution temporelle de la température surfacique est $\theta(0, t) = 0,8 P_0 \cdot \sqrt{t}$, à l'expression analytique suivante :

$$\theta(z, t) = 1,5 P_0 \sqrt{t} \operatorname{ierfc}(z/u) + P_0 \frac{p}{2} \lambda [\operatorname{erfc}(z/u) - \exp(-2z/p)]$$

expression dans laquelle : $u = 2(at)^{0,5}$ est la classique **chemin de diffusion thermique**, et les fonctions erfc et ierfc les classiques fonctions déduites de la fonction d'erreur.

À titre d'**exemple**, pour $f = 3$ kHz et $P_0 = 1\,000$ W/cm², cette expression donne $\theta = 800$ °C au bout de $\tau = 3$ s de chauffage à une profondeur $z = 4$ mm.

En fait, cette **profondeur austénitisable** juste en fin de chauffage va s'épaissir par conduction thermique pendant la durée séparant la fin de chauffage du début de la trempe.

Pour estimer cet épaississement de la tranche à plus de 800 °C, on peut grossièrement assimiler le profil thermique de fin de chauffage à la droite :

$$\theta(\tau) = \theta_s [1 - z/u]$$

avec $\theta_s > 800$ °C,
 $u = 2(at)^{0,5}$,

et suivre l'**aplatissement par conduction de ce profil** pendant le délai de trempe $t' = t - \tau$.

La solution analytique montre que, en l'absence d'échange superficiel, la température de surface évolue de θ_s à :

$$\theta' = \theta_s \operatorname{erf}[\sqrt{(\tau/t')}]$$

juste avant trempe.

La profondeur potentielle de trempe martensitique correspond finalement à la profondeur pour laquelle $\theta(z, t') = 800$ °C, ce qui n'est pas très différent de :

$$z' = 2[1 - 800/\theta'] \sqrt{(\tau/t')}$$

En haute fréquence, $p \ll 2\sqrt{a\tau}$, la profondeur austénitisable est contrôlée par la conduction thermique : on se retrouve pour $z > p$ dans le cas, qui sera décrit au paragraphe 3.1.2, d'un apport surfacique constant.

Retenons que, **au-delà d'une durée d'application de la puissance de quelques secondes**, c'est la pénétration thermique par conduction qui devient prépondérante quelle que soit la fréquence, et qui limite [2] la **profondeur austénitisable, exprimée en mm, à approximativement $1,5\sqrt{t}$** .

Pour compléter ce résultat vers les courtes durées d'application de la puissance, on trouvera à la figure 12 les **abaques** de calcul – d'après [2] – de la durée de chauffage et de la puissance surfacique nécessaires – à 4 niveaux de fréquence – pour obtenir une **profondeur austénitisable** déterminée sans dépasser une certaine température de peau.

Pratiquement, ces abaques permettent de déterminer la fréquence optimale vis-à-vis de la cadence et de la consommation énergétique lorsque l'on veut obtenir une profondeur durcie donnée sur une surface à traiter déterminée de la pièce.

3.1.2 Chauffage par faisceau laser, faisceau d'électrons, ou torche plasma

Pour ce type de source, l'échauffement opère par interaction avec la matière, principalement les électrons, depuis la surface irradiée.

Pour un diamètre de faisceau D , et une vitesse de balayage v , le temps d'interaction est $\tau = D/v$.

Dans le cas du laser [21], l'absorption de l'onde électromagnétique par le matériau peut être caractérisée par un coefficient d'absorption α , fonction de l'indice optique du matériau ou du revêtement destiné à l'améliorer, ainsi que de l'état de surface de la pièce.

À titre d'**exemple**, dans le cas d'un laser CO₂ de longueur d'onde 10,6 μm, α vaut moins de 0,1 pour de l'acier poli finement, 0,2 pour de l'usinage très grossier, et 0,7 après phosphatation de la surface irradiée.

La résolution de l'équation de la chaleur dans le cas d'un solide semi-infini a des solutions analytiques avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

- caractéristiques thermiques indépendantes de la température ;
- pas de chaleurs latentes de transformation allotropique ;
- le produit $D \cdot v$ grand devant $2a$.

Dans ces conditions, un flux thermique effectif Φ conduit au profil thermique :

$$\theta(z, t) = \theta(0, t) \sqrt{\pi} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)$$

avec $\theta(0, t) = 2\Phi(at)^{0,5}/\lambda\sqrt{\pi}$.

Pour une interaction laser-matière de durée τ , la température au bout de $t > \tau$ est :

$$\theta(z, t) = 2\Phi\lambda^{-1}(at)^{0,5} \operatorname{ierfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{at}}\right] - [a(t-\tau)]^{0,5} \operatorname{ierfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}}\right]$$

On peut simplifier ces expressions par une approximation linéaire de la température avec la profondeur. On trouve alors pour la température de surface :

$$\theta_s = A \Phi (a\tau/\lambda)^{0,5}$$

où A est une constante tenant compte du rendement global du traitement. La température de surface varie encore comme la racine carrée du temps d'interaction.

3.2 Limitations imposées par la métallurgie

Ces limites concernent d'une part, les cinétiques d'austénitisation de l'acier, sensibles à la structure initiale pour les chauffages rapides et, d'autre part, les trempabilités un peu particulières qui en résultent lors du refroidissement. Certaines nuances sont plus adaptées que d'autres à ces cycles rapides, de même que certaines géométries de pièce sont plutôt à éviter.

3.2.1 Bases de choix de l'acier

Trois facteurs principaux vont guider ce choix [22] : la dureté superficielle, les propriétés mécaniques souhaitées pour le métal de base non affecté par le traitement, la profondeur de durcissement imposée.

Pour le comportement en fatigue ou la tenue à l'usure, on cherche d'abord une dureté superficielle *plancher*. Pour les aciers faiblement alliés, cette dureté superficielle est fonction de la teneur en carbone en solution, donc de la teneur nominale dès que le chauffage avant trempe permet l'homogénéité compositionnelle de l'austénite (tableau 4). Au-delà de 0,5 % de carbone en solution, on gagne peu en dureté et les risques de tapures à la trempe croissent de façon importante.

Pour les faibles épaisseurs à durcir, les transitions de dureté sont brutales, tout ce qui est austénitisé se transformant en martensite, même pour des compositions de faible trempabilité.

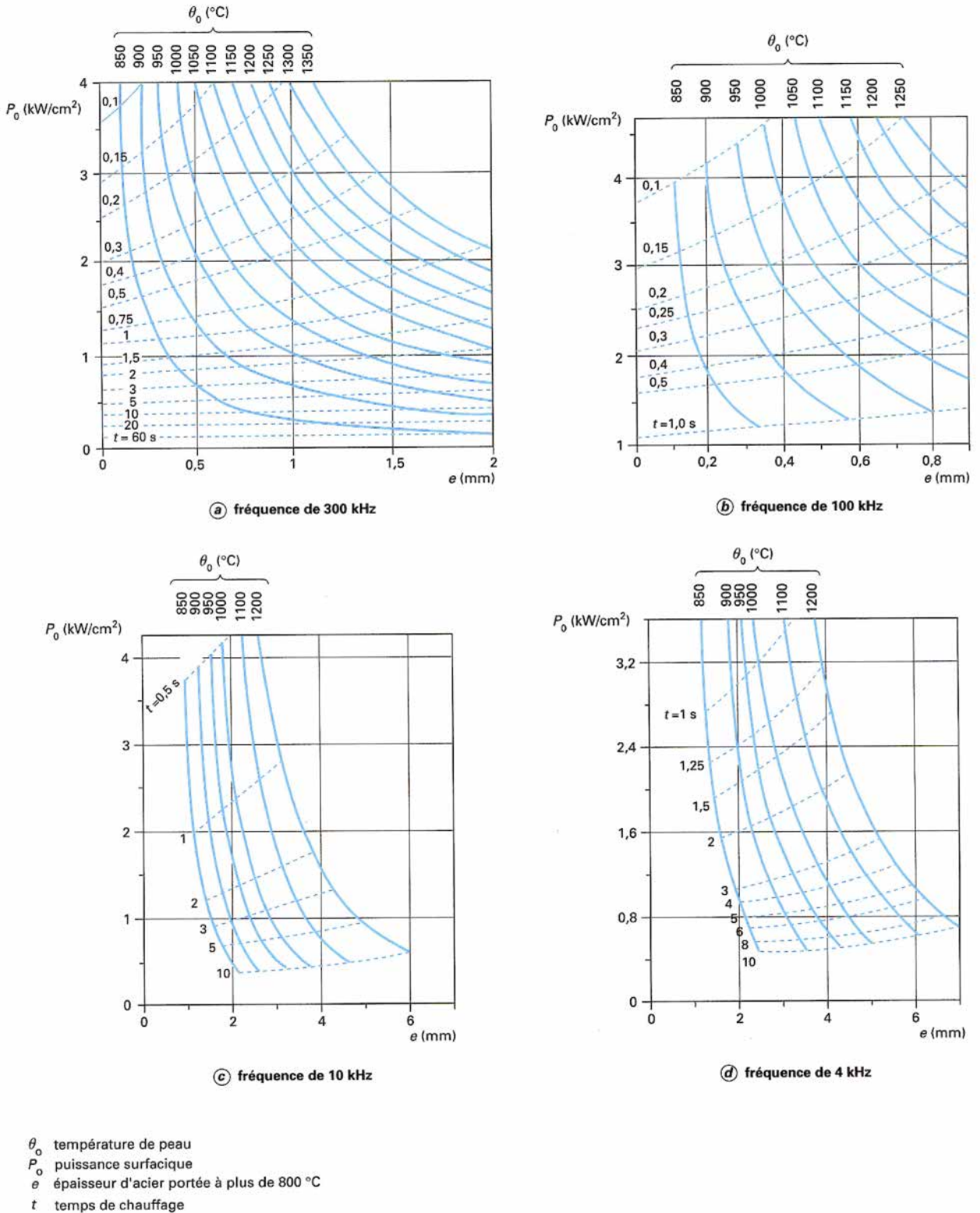


Figure 12 - Abaqués de calcul du temps de chauffage et de la puissance surfacique nécessaire en fonction de l'épaisseur à durcir et de la température de surface tolérée pour une trempe superficielle par induction à 300 ; 100 ; 10 et 4 kHz

Bien noter au passage qu'un acier comme le 100 C6, chauffé même longtemps à 830 °C, ne peut avoir que la moitié de son carbone mis en solution à cette température.

Pour les profondeurs de traitement supérieures à 2 mm, la constance de la profondeur durcie sur des pièces traitées en grande série (où les réglages intermédiaires sont exclus) impose un respect scrupuleux de la structure de livraison et de la trempabilité de l'acier, notamment au niveau des teneurs en éléments résiduels [23]. La figure 13 en donne un exemple d'après [24].

Globalement, l'effet des éléments d'addition sur la trempabilité peut être estimé à travers des équivalences entre teneurs du type :

$$Mn_{eq} = Mn + 1,1 Cr + 0,4 Ni + 2 Mo + 1,5 V + 0,3 Si$$

Bien que tous les aciers de traitement thermique puissent subir la trempée superficielle, trois familles d'aciers sont spécialement retenues pour leur intérêt vis-à-vis de ce traitement.

■ Les aciers au carbone genre XC pour lesquels la réponse en dureté superficielle découle directement de la teneur en carbone en solution. Toutefois, les duretés martensitiques après chauffage et trempée rapides peuvent être plus élevées que lors du même refroidissement après chauffage prolongé (plages de martensite à plus forte teneur en carbone, contraintes résiduelles) comme le montre la figure 14.

■ Les aciers alliés de type C 4, CD 4, M 4 pour lesquels l'effet des éléments d'addition sur la trempabilité peut être estimé à travers des équivalences entre teneurs du type Mn_{eq} défini ci-dessus.

■ Les aciers microalliés au vanadium, pour lesquels on peut profiter d'un certain durcissement par les carbures de la structure initiale ferrite-perlitique ou trempée-revenue du cœur, et contrôler la finesse du grain par les carbures non remis en solution dans la couche superficielle traitée (possibilité d'une certaine surchauffe).

Une sélection des aciers utilisables est rappelée dans le tableau 5.

Dans la pratique, les aciers fins au carbone à teneur voisine de 0,42 % sont les plus couramment utilisées pour la trempée par induction. Le tableau 6 présente les alliages ferreux fréquemment durcis par induction.

3.2.2 Cinétiques d'austénitisation lors de chauffages rapides

Les cycles considérés comportent un chauffage rapide de durée τ , et généralement un délai de durée t' avant trempée.

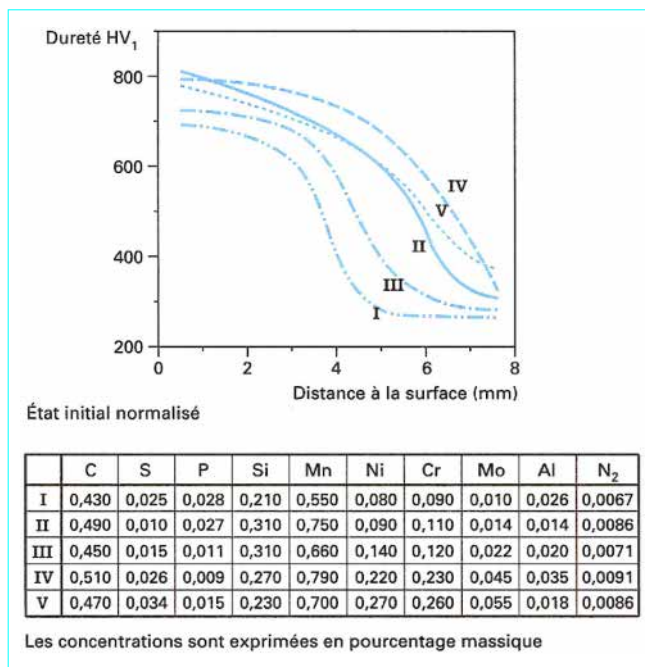


Figure 13 – Graphique illustrant l'influence de la composition chimique (et donc de la trempabilité) pour un acier de type XC 48 chauffé par induction dans le cas d'une profondeur durcie importante [24]

Tableau 4 – Évolution de la dureté en fonction de la teneur en carbone de martensite d'aciers faiblement alliés à austénite homogène avant trempée

C (% en masse)	0,20	0,32	0,38	0,42	0,48	0,55
HV _{mini}	450	550	600	650	680	720
HRC _{mini}	45	53	56	58	60	63

Tableau 5 – Exemples d'aciers utilisables pour les traitements thermiques superficiels

Dureté superficielle minimale garantie (en HRC)	Nuances selon NFA 35-563	Dureté superficielle minimale garantie (en HRC)	Nuances selon NFA 35-563
52	XC 38 H1 et H2 38 MnSiV S5	55	40 M6 38 CD4
53	38 C2 38 C4	56	42 C2 42 C4 49 MnSiV S3
53	38 B3 38 MB5 38 CB 1	57	XC 48 H1 et H2 42 CD4
54	XC 42 H1 et H2 44 MnSiV S6	59	XC 55 H1 et H2 50 CV4

Tableau 6 – Liste non exhaustive des alliages ferreux fréquemment traités par induction			
Non alliés	Alliés	Aciers de décolletage	Inox
XC18	20M5	35MF6	Z30C13
XC25	20MC5	10NC6	
XC38	45SCD6	cémenté	
XC42TS	55SC7		
XD48	37C4		
XC55	42C2		
XC65	100C6		
...	20CD4		
	25CD4		
	35CD4		
	42CD4		
	30CD12		
	50CV4		
	20NC6		
	30NC11		
	35NCD6		
Fontes pour trempe par induction Pratiquement toutes les formes non ferritiques			
Aciers frittés pour trempe par induction Tous aciers frittés suffisamment chargés en carbone			

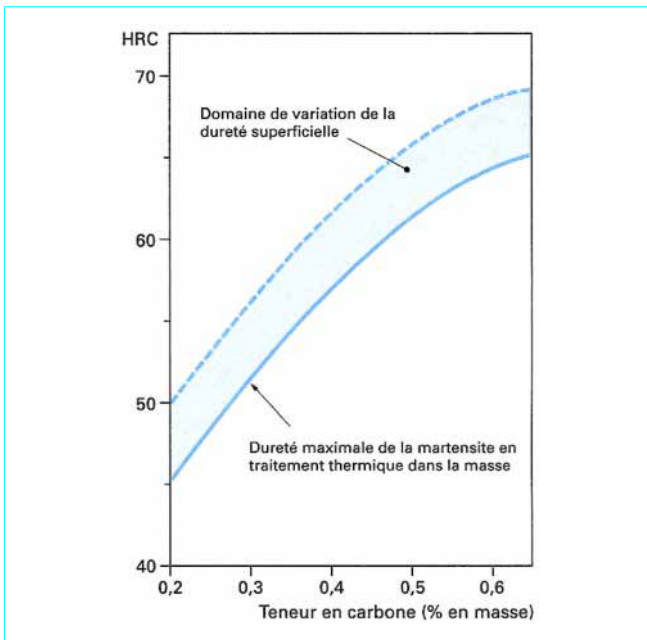


Figure 14 – Dureté de la martensite et dureté superficielle après trempe superficielle

Les informations concernant la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ lors de chauffages rapides sont contenues dans des diagrammes de transformation en chauffage continu [25] dans lesquels sont définies, pour chaque loi de chauffage, les températures auxquelles débute et se termine la transformation en austénite des phases stables à la température ambiante. On en trouvera deux exemples : l'un à la figure 15 pour une nuance du type XC 48 d'après [25], et l'autre à la figure 16 pour un acier XC 42 ferrite-perlitique [26].

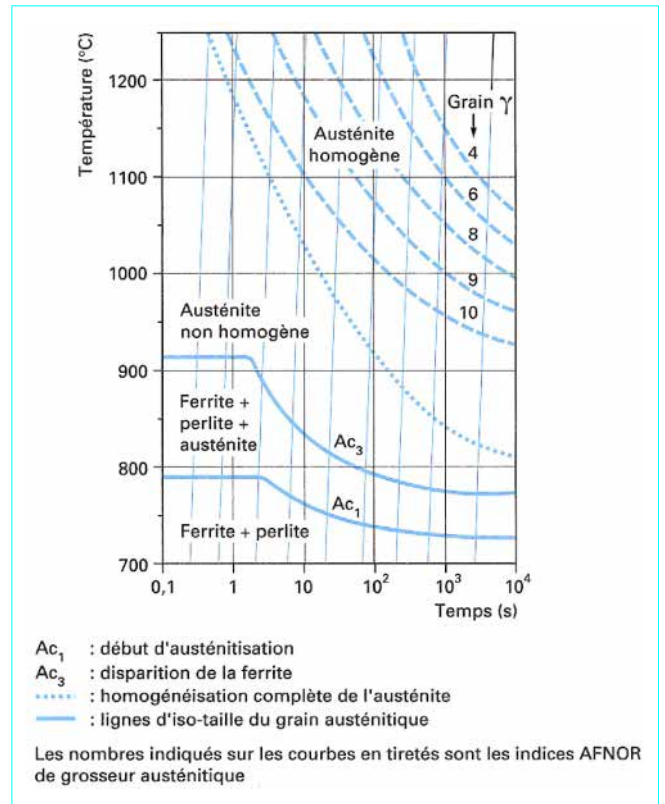


Figure 15 – Diagramme de transformation en chauffage continu d'un acier XC 48 (d'après [42])

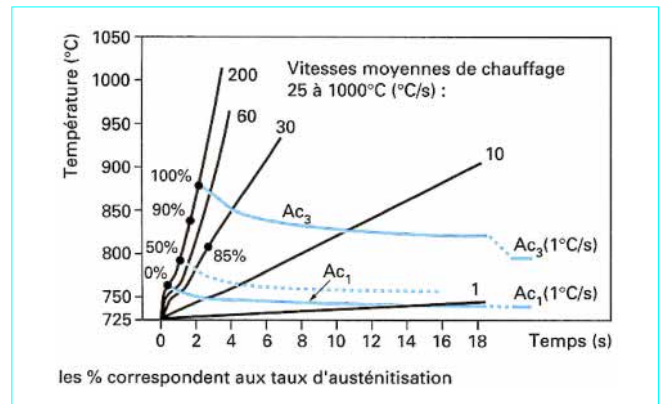


Figure 16 – Évolution des points de transformation Ac₁ et Ac₃ avec la loi de chauffage dans le cas d'un acier XC 42 ferrite-perlitique [26]

L'utilisation pratique de ces diagrammes pour des cycles très rapides comporte deux difficultés : la non-linéarité du chauffage vers 750 °C, fonction de la massivité de la pièce, et la prise en compte du délai t' avant trempe (pendant lequel la diffusion continue à opérer).

La représentation sur ces diagrammes des mises en solution des différents carbures ne peut être aussi simple que sur un diagramme d'équilibre régi par la seule notion de produit de solubilité. Les cinétiques de dissolution vont être influencées par la morphologie et la

composition des carbures, notamment si ces derniers sont initialement coalescés et fortement substitués, et par la vitesse de progression du front de transformation austénitique (de la perlite à 0,7 % C s'austénitise à partir de 725 °C et de la ferrite sans carbone au-delà de 910 °C).

Pour la cémentite perlitique, la cinétique de dissolution dans l'austénite est d'autant plus rapide que les lamelles de carbure sont fines et rapprochées, donc initialement formées à relativement basse température et non coalescées. Typiquement, une seconde à 800 °C suffit à austénitiser une perlite très fine d'acier XC 70 initialement formée vers 600 °C, alors qu'il reste encore des lamelles de cémentite après 3 s de maintien à 950 °C d'un acier XC 42 globulisé [26]. L'homogénéisation de la distribution du carbone en solution est évidemment plus difficile si la structure initiale présente des grains de ferrite dispersés au milieu de grains de perlite.

À titre d'exemple, pour un acier ferrito-perlitique à 0,4 % C ayant un grain d'environ 10 μm, un grain sur deux est perlitique, et s'austénitise rapidement entre 750 et 800 °C. En revanche, l'homogénéité du carbone dans l'austénite des anciens grains de ferrite suppose que l'intégration du *chemin de diffusion* du carbone au cours du chauffage avant trempe (durée $\tau + t'$) dépasse 5 μm, ce qui conduit à :

$$\Sigma D \cdot \partial \tau > 25 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$$

où le coefficient de diffusion du carbone dans l'austénite $D = 0,16 \exp[-16\,575/T]$.

Ce résultat est à peine atteint en surface pour un chauffage correspondant à 1 s de maintien à 1 000 °C. Il en résulte pour les traitements à grande vitesse de défilement et faible profondeur l'impossibilité de transformer de l'austénite homogène (figure 17) et, dans le cas de chauffages très rapides au défilé sous faisceau laser ou FE suivis d'autotrempe, des profils de dureté très dépendants de la structure initiale de l'acier, comme le montre la figure 18 d'après [24].

Le fait que la morphologie de la cémentite, ainsi que les substitutions en éléments d'addition stabilisants Cr, Mn et Mo dans celle-ci jouent un rôle sur les températures de fin de dissolution des carbures est à prendre en compte dans le cas du traitement superficiel de pièces forgées à froid, donc souvent adoucies préalablement au maximum par un traitement de globulisation.

Plus généralement, pour obtenir le maximum de durcissement et d'endurance et souvent le minimum de fragilité, il est recommandé de faire porter les traitements rapides (par induction ou laser) sur des aciers à perlite lamellaire fine, ou mieux sur des pièces préalablement trempées et revenues.

L'homogénéité de composition de l'austénite n'est obtenue que pour des parcours de diffusion du carbone et des éléments d'alliage comparables à la taille du grain ferrito-perlitique ou à la distance moyenne des carbures de la microstructure initiale.

L'épaisseur trempée lors de cycles thermiques très rapides dépend également de l'état structural du matériau. L'épaisseur et la dureté seront plus importantes avec un état prétraité ou normalisé qu'avec un état perlite globulisée, qui pourra conduire à des difficultés de trempe (cf. figure 18).

On peut ajouter ici qu'un préchauffage de la pièce à traiter, même localisé près de la surface, peut augmenter très sensiblement le volume de la couche austénitisée et donc accroître la profondeur de durcissement par trempe après chauffage superficiel.

3.2.3 Transformation au refroidissement. Sujétions de la trempe

Le refroidissement doit être suffisamment intense pour que l'austénite se transforme en martensite sur l'épaisseur désirée pour le palier de dureté. La trempabilité après chauffage rapide, donc tenant compte des mises en solution incomplètes, contrôle le profil des structures de durcissement intermédiaires. L'effet se fera d'autant plus ressentir que la profondeur traitée est importante.

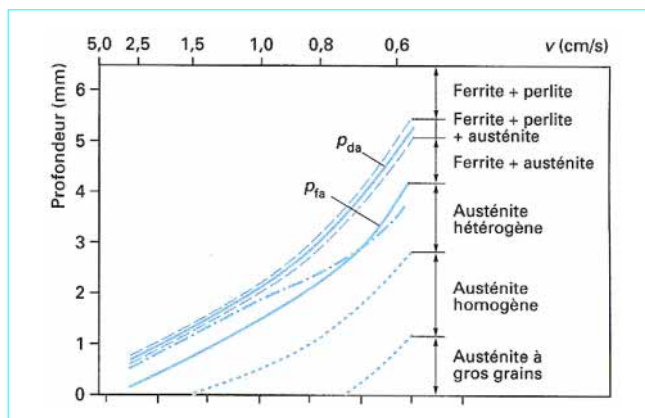


Figure 17 – Exemple d'effet de la vitesse de défilement (autres paramètres fixés) sur l'évolution des caractéristiques structurales au cours du traitement et sur la profondeur p₅₅₀ HV [26]

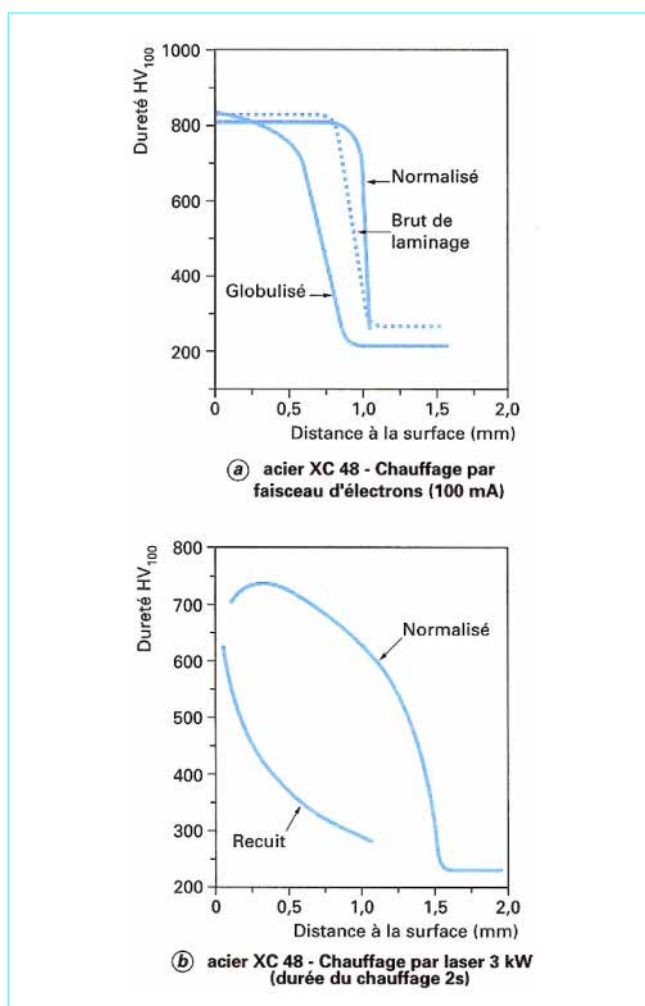


Figure 18 – Graphiques illustrant l'influence de l'état structural initial de l'acier de base [24]

Les traitements avec refusion superficielle de pièces en fonte, ou les durcissements martensitiques – de type traitement laser – pour lesquels l'épaisseur austénitisée est très faible vis-à-vis de la massivité de la pièce se contentent généralement d'un refroidissement naturel.

Pour les durcissements martensitiques relativement plus profonds, il faut des trempes plus sévères, le plus souvent des douches à l'eau intervenant avant que les couches austénitisées les plus profondes n'aient atteint 650 °C en refroidissement naturel.

De telles trempes risquent de conduire à des tapures pour les aciers alliés à plus de 0,5 % C. Aussi, fait-on souvent appel dans ces cas difficiles à des adjuvants en concentration contrôlée dans l'eau (généralement des polymères de type polyalkylène glycol), ainsi qu'à un réchauffage entretenu du liquide de trempe.

Pour la plupart des aciers mis en œuvre dans les traitements superficiels, il suffit d'une vitesse de refroidissement de quelques dizaines de °C/s vers 650 °C (typiquement, 10 °C/s pour un 42 CrMo 4, 100 °C/s pour un XC 42), pour obtenir de la martensite à partir de métal porté au-delà de 800 °C. Si donc l'épaisseur relative de métal chauffé est suffisamment faible, on peut avoir recours à de l'air soufflé (air comprimé détendu en rideaux directs), ou encore à des brouillards (air comprimé + eau pulvérisée).

En cas de trempe martensitiques sévère, on peut envisager d'améliorer la résilience de la pièce en pratiquant, sitôt après trempe, soit un adoucissement à basse température pour les nuances non alliées (figure 19), soit de brefs revenus à plus haute température sur les nuances un peu alliées (figure 20).

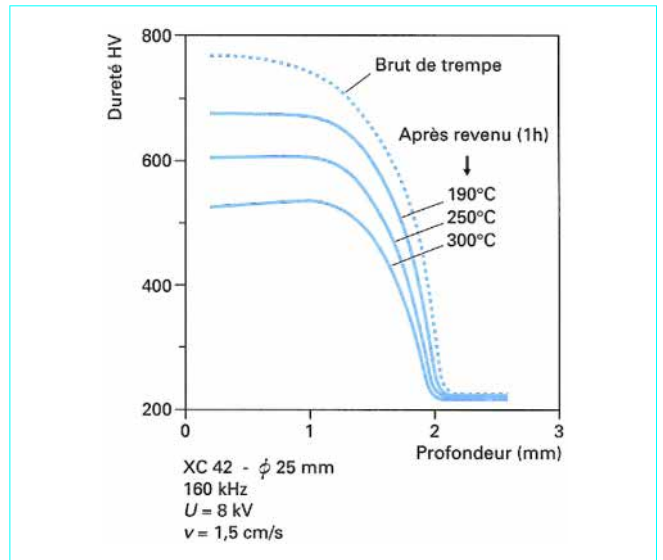


Figure 19 – Adoucissement d'un acier XC 42 traité par induction lors d'un revenu à basse température [26]

3.2.4 Précautions à prévoir au plan d'une pièce traitée superficiellement

Au niveau de la préparation de la gamme de fabrication et du plan des ébauches ou pièces brutes, on doit tenir compte du traitement en prévoyant des aménagements du dessin. Il est même conseillé d'en tenir compte dès la conception de la pièce. En effet, le processus rapide de chauffage peut engendrer les difficultés suivantes :

- les **angles vifs ou saillants**, très sensibles aux effets de pointe et au flux de chaleur, risquent d'être surchauffés ;
- les **angles droits de raccordement**, et plus encore l'**absence de congés** de raccordement sont à proscrire ; d'une part, ils peuvent provoquer des tapures de trempe par formation de contraintes résiduelles d'extension, d'autre part, ces zones s'avèrent délicates à chauffer ;
- le traitement par induction peut rendre nécessaire un **équilibre des masses de la pièce** afin de minimiser les déformations liées aux contraintes créées dans la couche trempée ;
- les **paramètres de chauffage** (température, temps compatibles avec la profondeur de trempe recherchée, puissance du générateur, fréquence...), les **paramètres de refroidissement** (avance ou retard de douche, débit de la douche) sont autant de critères qui jouent sur la qualité du traitement ;
- le **profil du traitement** doit être étudié avec soin, notamment pour que les zones sollicitées ne correspondent pas à une zone d'arrêt du traitement ; en effet, les caractéristiques mécaniques étant liées à l'état de contraintes résiduelles introduites par le traitement, les zones de fin de traitement qui sont le siège de contraintes de tension ne doivent pas correspondre à une zone sollicitée en service.

Afin d'illustrer le savoir-faire industriel en matière de profil de durcissement par induction, nous présentons à la figure 21 des coupes avec attaque acide sur différents types de pièces automobiles *difficiles*.

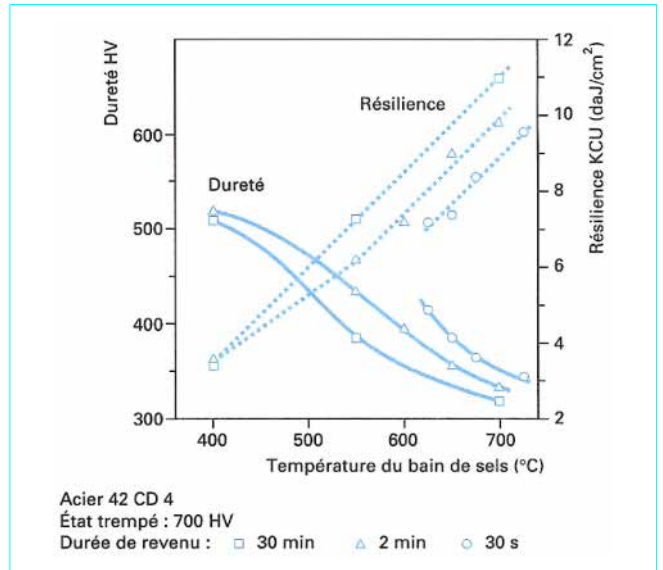


Figure 20 – Effet de revenus courts à différentes températures sur la dureté et la résilience d'éprouvettes Charpy U trempées [26]

3.2.5 Défauts pouvant accompagner ces traitements

Les défauts de traitements peuvent avoir trois origines, souvent couplées : la métallurgie, la géométrie de la pièce et la gamme de traitement.

- **Présence de points doux** ou de **zones non durcies**, se rencontrant soit dans le cas d'une mauvaise adaptation de forme ou d'entrefer de l'inducteur, soit par insuffisance de la trempe. Le même type de défaut est observable en trempe au défilé si la vitesse de passage dans l'inducteur n'est pas adaptée.

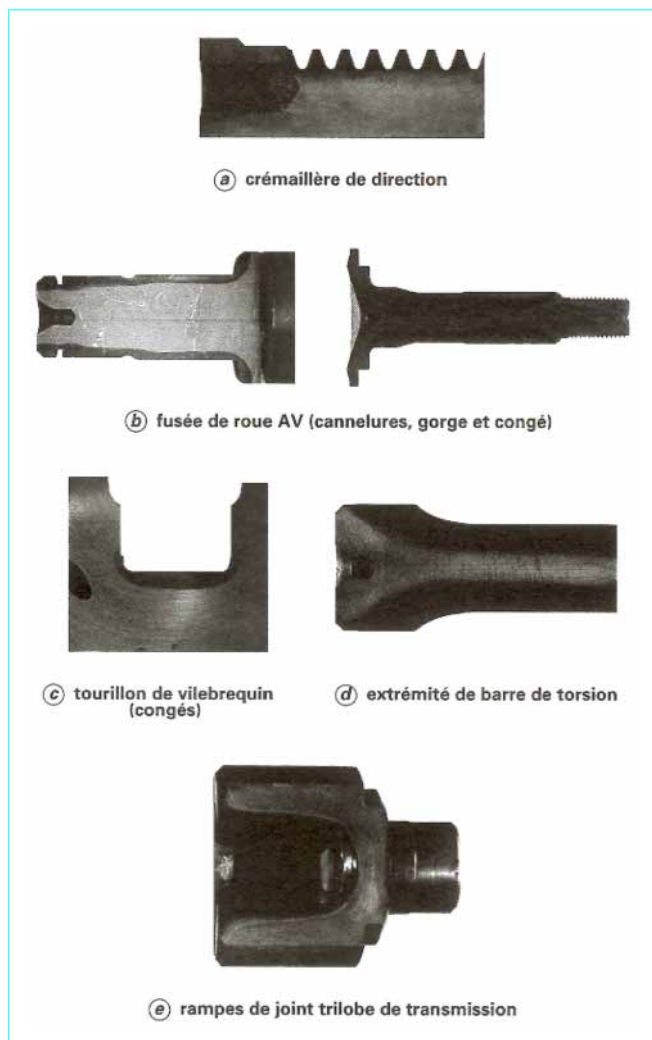


Figure 21 – Exemples de profils de durcissement par induction obtenus en grandes séries sur quelques types de pièces automobiles

■ **Brûlures**, conséquence d'une austénitisation locale à trop haute température.

■ **Structures de trempe incorrecte** (retard de douche trop important) avec présence de constituants perlitiques ou bainitiques.

■ **Tapures de trempe** qui peuvent apparaître dans le cas d'une douche non adaptée (fluide sans retardant, débit mal réglé, température froide au démarrage d'une installation). Une teneur massique en carbone trop élevée (> 0,50 %) rend également l'acier plus sensible à ce type de défaut. Elles apparaissent parfois dans des pièces de faibles dimensions ou de forme compliquée présentant des zones de concentration de contraintes (effet d'entaille).

■ **Martensites hétérogènes** résultant d'une austénite de composition hétérogène en fin de chauffage rapide [27].

3.3 Aide et limites des simulations numériques

La modélisation numérique d'un problème particulier de traitement est surtout mise en œuvre pour optimiser l'outil et les conditions de charge thermique susceptibles de répondre économiquement aux sollicitations prévues par le bureau d'études.

Dans le cas des sources purement surfaciques de type faisceau laser, faisceau d'électrons, ou torche plasma [44], les modélisations doivent faire des hypothèses sur le rendement de l'interaction faisceau-surface métallique pour pouvoir prévoir la dimension et le mouvement de la fenêtre d'interaction.

Dans le cas des traitements par induction, l'évolution de la profondeur de pénétration avec le champ exciteur et la température est évidemment primordiale. À cette fin, la simulation électromagnétique nécessite une connaissance précise de deux séries de données : résistivité électrique et courbes d'aimantation $B(H, T)$ pour des champs magnétiques allant jusqu'à plus de 10^5 A/m. Une simulation réaliste passe donc avant tout par une banque de données matériaux précise [28].

La simulation en 3 D s'impose lorsque le problème à traiter ne présente pas une géométrie de révolution ou des symétries permettant de rester en 2 D. Il existe deux grandes familles de méthodes numériques permettant une telle modélisation 3 D, l'une basée sur la méthode des éléments finis et l'autre sur la méthode des intégrales de frontière.

Dans les deux cas, les équations à résoudre sont les équations de Maxwell complétées par les classiques relations de continuité électrique et magnétique aux interfaces des régions de propriétés différentes.

La **méthode des intégrales de surface** consiste à prendre comme domaine d'étude la *peau* du domaine ; elle n'est donc applicable que lorsque la fréquence de travail est très élevée.

Dans la **méthode des éléments finis**, il existe plusieurs formulations possibles, telles [46] :

- la formulation en potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} ($\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$) et potentiel scalaire électrique V ($\mathbf{E} = -\text{grad } V$) qui est la formulation la plus générale mais aussi la plus gourmande en mémoire puisque l'on a 7 inconnues réelles par nœud dans les parties conductrices et 6 ailleurs ;
- la formulation en potentiel vecteur magnétique modifié $\mathbf{A}' = \mathbf{A} + (j\omega)^{-1} \text{grad } V$ (ω pulsation des sources) ;
- la formulation en potentiel scalaire magnétique Φ ($\mathbf{H} = \text{grad } \Phi$) et le vecteur électrique \mathbf{T} ($\mathbf{J} = \text{rot } \mathbf{T}$) ;
- la formulation en impédance de surface, qui consiste à écrire dans le code de calcul que la décroissance des champs et des courants dans la direction normale à la surface du conducteur est connue dès que l'épaisseur de peau est faible (hautes fréquences).

La modélisation de problèmes magnétodynamiques 3 D est très vite confrontée à des problèmes de capacité machine, ce qui nécessite de se limiter à une partie de la géométrie, à introduire des périodicités dans certains codes et à optimiser le maillage.

Même dans le cas simple d'une pièce cylindrique, la modélisation flux 2 D magnétodynamique-thermique à partir d'un maillage adapté donne des résultats assez différents suivant que l'on opte pour des propriétés linéaires ou non linéaires d'aimantation de l'acier en dessous de la température de Curie. Ce type de modélisation a l'avantage de fournir des résultats mesurables, comme l'évolution des grandeurs électriques sur l'inducteur, ou les cartes thermiques en fin de chauffage, et surtout de pouvoir s'interfacer – par les températures ou les densités de puissance aux nœuds – à un autre code 2 D simulant les évolutions des structures métallurgiques et des contraintes.

Lorsqu'il faut se résoudre à la modélisation 3D en éléments finis, les limitations actuelles sont les suivantes :

- les quelque dizaines de milliers d'éléments sont difficiles à partager entre la pièce-culasse-inducteur et tout l'espace de refermeture des lignes de champ ;
- les propriétés des matériaux sont supposées linéaires et indépendantes des effets thermiques ;
- la résolution en potentiel vecteur magnétique qui seule permet de prendre en compte les sources de tension excitatrice doit même se contenter de supposer constantes la résistivité et la perméabilité de la pièce.

La répartition des courants induits est alors vite fautive dès que les plages de températures sont larges et les isothermes de forme inattendue.

On peut alors, tant que la profondeur de pénétration des courants induits est faible par rapport à la dimension de pièce, combiner en magnétodynamique un calcul par la méthode des équations intégrales de frontière : seules les surfaces sont alors maillées d'où un gain de mailles important.

4. Matériels pour la mise en œuvre industrielle de ces traitements

4.1 Sources d'énergie

Nous ne reviendrons pas sur les sources de type laser, faisceau d'électrons, torche plasma, largement décrites dans la référence [44], et nous détaillerons un peu le cas du traitement par induction.

Les sources, ou générateurs d'induction, alimentées à la fréquence du réseau, ont pour fonction de fournir à l'inducteur la fréquence et la puissance active désirées, avec des rampes initiales *raides* dans le cas de traitements *flash*.

La moyenne fréquence est moins sensible aux dispersions d'entrefer (puissance réactive d'entrefer proportionnelle à la fréquence), et s'adapte donc mieux aux contours géométriques difficiles. On a donc tendance à l'utiliser, même pour des faibles épaisseurs (1,5 mm), en travaillant à forte puissance et faible temps d'interaction.

On peut en distinguer quatre familles de générateurs :

- les **convertisseurs à groupe rotatif** (le type le plus ancien) : fréquence fixe, de 250 Hz à 10 kHz – puissance de 50 à 300 kW ;
- les **onduleurs statiques à thyristors** : fréquence de fonctionnement ajustable de 25 à 30 % de la fréquence nominale : 100 Hz à 50 kHz – puissance : jusqu'à 600 kW ;
- les **générateurs à tubes** : fréquence fixe de 10 à 400 kHz – puissance généralement inférieure à 100 kW, mais il existe maintenant des générateurs d'impulsions à lampes de plusieurs centaines de kW ;
- les **générateurs à transistors** : ils couvrent aujourd'hui pratiquement toute la gamme utile de fréquence (quelques kHz à 400 kHz) et de puissance (jusqu'à 1 200 kW) avec des rendements supérieurs à 90 % à puissance nominale ; ce type de générateur transistorisé (transistors de type MOSFET ou IGBT) remplace de plus en plus le générateur à triode, d'autant que son prix est inférieur au quart à celui de ce dernier, qu'il ne nécessite pas de remplacement périodique de composants onéreux, que sa surface au sol est moitié moindre à puissance égale, et qu'il présente une faible tension d'utilisation (moins de 500 V).

4.2 Machines de présentation des pièces et postes de travail

On peut distinguer les traitements statiques pour lesquels la position relative de la pièce par rapport à l'inducteur reste inchangée (même si elle est en rotation), et les traitements au défilé pour lesquels un point quelconque de la pièce ne se retrouve jamais en vis-à-vis du même point de l'inducteur.

Dans le cas des **traitements statiques**, auxquels ont surtout recours les grandes séries intégrées en ligne de fabrication, les machines de présentation peuvent être :

- de type à *barillet* figure 22 ;
- de type à *plateau tournant* (exemple de machine pour bols de fusées sur la figure 23).

Dans le cas des **traitements au défilé**, plus flexibles et mieux adaptés aux petites séries, on peut trouver :

- des procédés à *passage* d'inducteur avec pièce en rotation entre pointes (arbres de roue) ;
- des dispositifs à *plateau tournant* avec pièce en rotation (axes divers, moyeux...) ;
- des dispositifs avec inducteur fixe et pièce entraînée en rotation, *centerless* (axes de fourchettes ou de culbuteurs), sur tambour (tiges de culbuteurs) etc.

4.3 Outils de chauffage

Nous nous intéresserons aux inducteurs, les outils de chauffage pour les techniques laser, FE et plasma étant déjà présentés dans la référence [44].

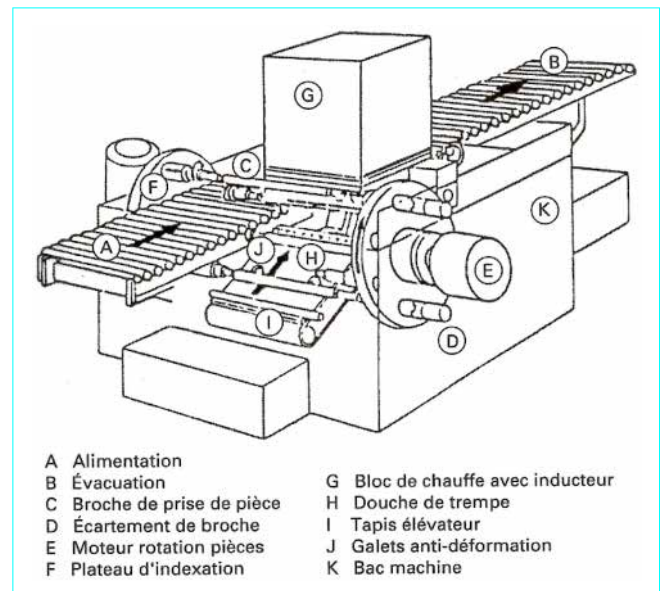


Figure 22 – Machine « traversante » de trempe horizontale « single-shot » de barres de torsion 600 kW-10 kHz 500 pièces par heure

Compte tenu de l'expression rappelée au paragraphe 3.1.1 pour la puissance spécifique fournie par un inducteur, on doit concevoir celui-ci pour délivrer, à la fréquence choisie selon les considérations précédentes, la distribution adéquate de champ magnétique en surface des zones de pièce à traiter. Il en résulte des géométries très variées comme celles présentées sur la figure 24.

Cette conception est encore le plus souvent empirique, mais des logiciels de simulation électromagnétique type flux 3 D permettent de guider les cas difficiles.

Le couplage, donc la distance pièce-outil lors de leur déplacement relatif pendant le chauffage, joue évidemment un rôle important pour éviter des défauts de profil ou des brûlures locales, notamment par surchauffe liée à des effets de pointe.

Compte tenu des fortes intensités mises en jeu, l'inducteur doit être soigneusement refroidi par une circulation d'eau adaptée (section du tube, débit, surpresseur, risques d'entartrage). On utilise généralement du cuivre, bon conducteur et facile à façonner soit par formage pour les tubes, soit par usinage (classique ou électroérosion) pour les inducteurs massifs.

Afin d'assurer une bonne fiabilité des inducteurs, notamment au niveau de la précision de couplage et des risques de ramponnage, on doit rigidifier les boucles inductrices soumises à des forces électromagnétiques importantes : spires noyées dans du ciment réfractaire ou de la résine époxyde, montages complets réalisés en Céloron ou époxyde...

Réalisés avec ou sans douche incorporée, les inducteurs peuvent être de type **ouvert** (à passage, en épingle, linéaire), ou **fermé** (monospire en tube ou usiné dans la masse, multispire en bobine, plat). On retrouvera certaines de ces géométries à la figure 24.

Dans certaines applications, on renforce localement le champ magnétique en refermant judicieusement les lignes de fuite grâce à des cavaliers concentrateurs de champ, disposés près des zones à chauffer. Ces concentrateurs de champ optimisent la canalisation du flux magnétique et en accroissent localement la densité (figure 25).

Deux types de concentrateurs sont actuellement utilisés :

- tôles magnétiques à grains orientés ; feuilletées et isolées entre elles ;
- poudres de fer agglomérées dans des résines isolantes.

Ces derniers noyaux sont faciles à mettre en forme et en place, mais un peu fragiles.

On peut mentionner ici l'utilisation fréquente d'inducteurs linéaires dont la partie active est constituée d'un conducteur ou d'une épingle à cheveux équipés de concentrateurs de champ devant lesquels on fait défiler le produit ou tourner un produit cylindrique comme les barres de torsion (figures 22 et 25a).

Les inducteurs pour les traitements de grande série restent des outils peu tolérants et vulnérables. Ils peuvent se détériorer par collision avec la pièce lors des transferts, amorçage électrique entre pièce et inducteur, manque de refroidissement, déformations électrodynamiques, mauvaise tenue des concentrateurs. On peut réduire les incertitudes de couplage inducteur-pièce en utilisant des gabarits de réglage et de positionnement facilitant les changements d'inducteur. Ces gabarits et raccords rapides permettent des délais de changement d'inducteur très courts, par exemple de l'ordre de la minute pour des machines prédisposées à la diversité comme celles traitant les variantes des joints tulipes.

Un inducteur complet avec concentrateur de champ et montage d'adaptation pour pièces de transmission revient aux environs de 15 kF.

Les durées de vie s'étalent entre 10 000 et 100 000 pièces, avec pour principales causes de défaillance, les collisions inducteur-pièce et le perçage des circuits d'eau de refroidissement. Ces derniers problèmes peuvent être fortement atténués par une alimentation avec pompe de surpression.

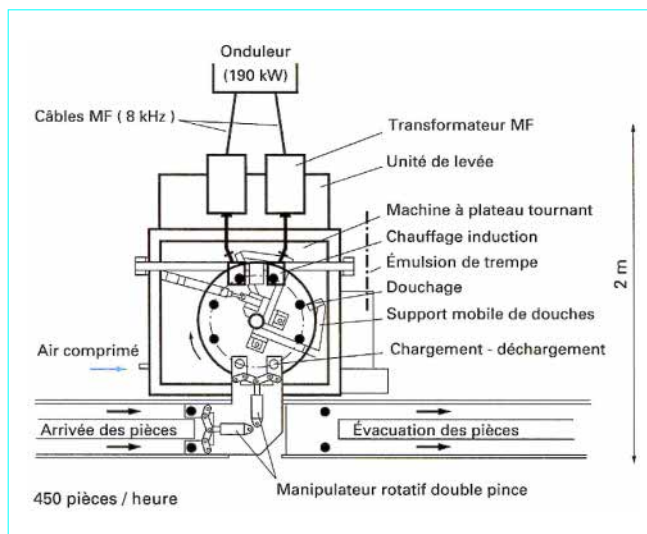


Figure 23 – Machine de trempage par induction à plateau tournant pour bols de fusées (vue de dessus)

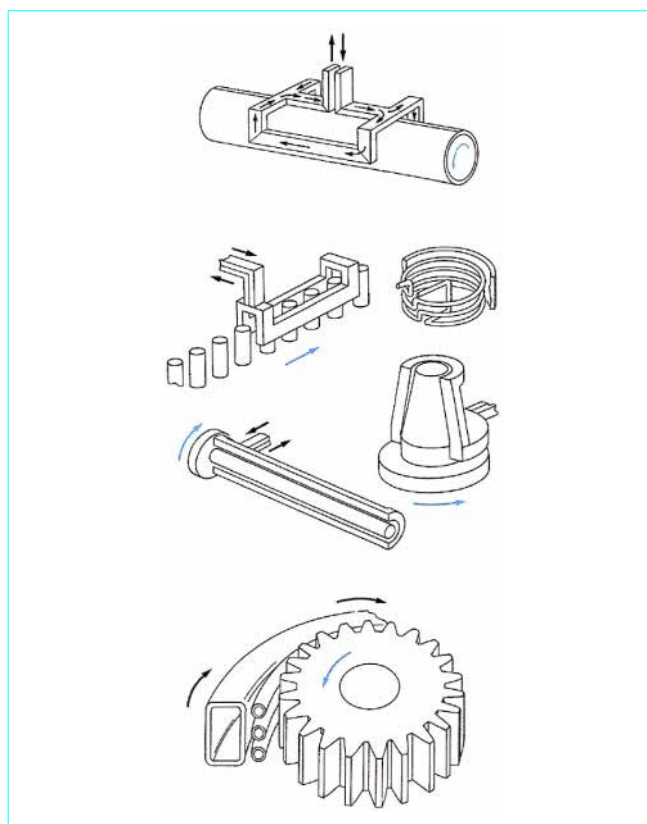


Figure 24 – Exemples de géométries d'inducteurs adaptés à différents types de pièces [39]

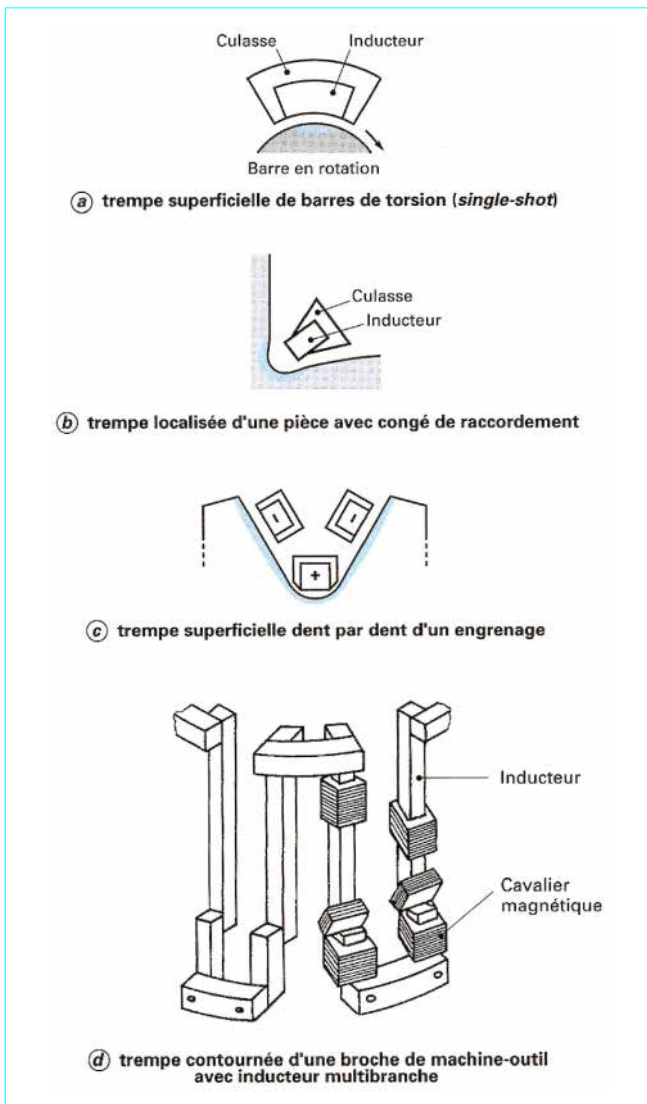


Figure 25 - Illustration de l'intérêt des concentrateurs de champ pour localiser des durcissements par induction

4.4 Outils de trempe

La douche peut être indépendante (cf. figure 3), incorporée à l'inducteur, ou faire place à un bac d'immersion. Comme nous l'avons vu, le délai entre fin de chauffage et début de trempe est un paramètre important qui peut nécessiter soit une chronologie rigoureuse, soit un refroidissement intermédiaire (par exemple à l'air soufflé).

Le douchage pendant le chauffage et sur la face opposée peut servir à contrôler l'épaisseur traitée. C'est le cas du traitement des rampes de joint trilobe de transmission automobile (cf. figure 21) pour lequel des douches opèrent sur les faces externes alors que l'inducteur fonctionne à l'intérieur du fourreau. Pour certains moyeux, le durcissement externe s'accompagne au contraire d'un refroidissement par l'alésage...

Des douches additionnelles peuvent compléter le refroidissement de pièce pour limiter l'autorevenu ou faciliter des opérations ultérieures.

4.5 Matériels périphériques

■ Refroidissement des circuits électriques

Ce circuit de refroidissement est généralement un circuit fermé d'eau déminéralisée partagé entre surpresseur, onduleur, inducteurs, transformateurs, condensateurs et barres de liaison.

L'eau brute passe dans l'échangeur et refroidit l'eau du circuit fermé. Une vanne s'ouvrant plus ou moins en fonction de l'échange demandé limite la circulation d'eau.

■ Centrale de fluide de trempe

Elle permet d'alimenter le refroidissement de la pièce en assurant une triple régénération :

- en température, par passage dans un échangeur et éventuellement régulation ;
- en propreté (tambour magnétique et filtration) ;
- en concentration d'adjuvant (ralentisseur de trempe, anti-oxydant) ; celle-ci étant généralement contrôlée à l'aide d'un réfractomètre.

4.6 Moyens de contrôle. Assurance qualité

4.6.1 Contrôle du processus

Les principaux paramètres susceptibles de faire l'objet d'un suivi régulier sont :

- les durées de chauffe, délai entre fin de chauffage et début de douche, douche elle-même ;
- l'énergie fournie à la pièce par le biais de la puissance débitée par le générateur [29] [30] [31] et de couplages reproductibles ;
- la sévérité de trempe (débit, pression, température, concentration et âge de l'adjuvant) ;
- le mouvement relatif pièce-inducteur ;
- la température de peau de pièce suivie par pyrométrie optique.

4.6.2 Contrôles au niveau de la pièce

Ces contrôles (non destructifs ou destructifs sur prélèvements) sont réalisés soit en sortie de machine, soit sur pièces finies.

Les principaux moyens de contrôle non destructif sont :

- la magnétoscopie et le ressuage, pour les criques et tapures ;
- les courants de Foucault, pour s'assurer du traitement de pièce ;
- l'attaque acide pour vérifier la localisation du traitement.

Les contrôles destructifs reposent sur les prises de dureté en surface et les coupes macrographiques suivant norme AFNOR NF A 04-203.

5. Exemples de réalisations industrielles avec chauffage par induction

5.1 Industrie automobile

Le tableau 7 fournit des exemples de sollicitations de pièces de l'industrie automobile pour lesquelles les durcissements par induction ont apporté une réponse industrielle.

Nous allons présenter succinctement quelques-unes des installations correspondant à ces applications.

5.1.1 Exemple d'une installation de traitement des vilebrequins

Nous avons vu (§ 2.1) que les manetons et tourillons de vilebrequin en fonte ou en acier peuvent voir leur tenue en fatigue améliorée par traitement par induction des surfaces portantes et des congés de raccordement avec les bras. Dans ce cas, les aciers forgés utilisés s'apparentent aux nuances 35 MV 7, 49 MVS 3, 38 Mn Si V S 3, tandis que les pièces moins sollicitées font appel à la fonte GS.

La figure 26 montre deux vues partielles d'une installation industrielle de durcissement par induction des paliers, manetons et portées de joint de vilebrequin automobile.

Les vilebrequins sont transférés par une barre à pas de pèlerin, pris entre pointes horizontales et mis en rotation lente. Les inducteurs en demi-coquille descendent pour assurer le chauffage des

manetons. La vue ne permet pas d'imaginer le mouvement assez complexe d'accompagnement décentré des inducteurs appuyés par des picots en carbures sur les surfaces de maneton à traiter.

La gamme de traitement comporte un retard au douchage pour éviter l'amorçage de criques sur les trous de graissage. On a aussi un indexage angulaire pour moduler la puissance de chauffe et le début de la trempe (déformations), ainsi qu'une rectification après traitement pour reprise des déformations finales.

L'engagement des générateurs (300 kW-10 kHz pour les manetons) atteint 85 % pour un temps de cycle de 26 secondes.

5.1.2 Exemple d'une installation de traitement des bols-fusées de roue

La figure 27 présente la partie fusée d'un bol-fusée de roue automobile et les principales spécifications des différents durcissements par induction demandés à la pièce.

Les principales caractéristiques de l'installation (cf. figure 23) mise en œuvre pour traiter ce type de pièce au niveau cannelures, congé, et face d'appui, sont les suivantes :

- machine à plateau tournant à 6 divisions et 2 pièces par poste pour 450 pièces/h ;
- alimentation par un onduleur de 190 kW-8 kHz délivrant 380 A sous 500 V ;
- temps de chauffe 5,2 s, retard douche 0,2 s, durée douche 7,4 s à 2×20 L/min ;
- inducteur multiple à concentrateurs de champ et de 2 mm d'entrefer.

Tableau 7 – Pièces automobiles traitées par induction

	Pièces	Améliorations visées par le traitement
Moteurs	Manetons et paliers de vilebrequins	Résistance au frottement et tenue à la fatigue en flexion alternée
	Axe de piston	Résistance au frottement et tenue à la fatigue en flexion plane
	Axe de culbuteur	Résistance au frottement
	Tige de culbuteurs	Résistance au frottement
	Arbre à cames	Résistance au frottement
	Queues de soupapes	Résistance au frottement
	Axe de commande de pompe à huile	Résistance au frottement
	Couronne de démarreur	Résistance au frottement et tenue à la fatigue en flexion plane
Boîtes de vitesses	Axe de fourchette	Résistance au frottement
	Axe de marche arrière	Résistance au frottement
	Arbre de convertisseur (1)	Résistance au frottement et tenue à la fatigue
	Bagues de roue libre (1)	Résistance au frottement
	Roue de parking (1)	Résistance au frottement
Liaisons au sol	Fusée de roue avant	Résistance au frottement, tenue à la fatigue et tenue aux chocs
	Portées de joints homocinétiques	Résistance au frottement et tenue à la fatigue de surface
	Crémaillère de direction	Résistance au frottement
	Barre de torsion	Résistance au frottement et tenue à la fatigue
	Arbre relais	Résistance au frottement, tenue à la fatigue et tenue aux chocs

(1) Boîtes de vitesses automatiques

5.2 Autres secteurs industriels

Les applications les plus fréquentes concernent le durcissement superficiel.

On peut citer le cas de traitement avec inducteurs linéaires de cylindres de laminoir, de diamètre allant jusqu'à 50 cm et de plusieurs mètres de long. Par rapport à des traitements plus classiques, les réductions de consommation d'énergie primaire peuvent atteindre un facteur 10.

On peut également mentionner :

- le durcissement des bagues et cages de roulement ;
- le durcissement des surfaces de vérins hydrauliques, des axes de chenille, des outils des machines de travaux publics ou agricoles ;
- le durcissement des outils : limes, peignes de l'industrie du textile etc. ;
- dans un autre domaine, le recuit longitudinal à grande vitesse par induction des cordons de soudure sur pipe-lines...

Les traitements par induction en sous-traitance représentent en France environ 15 % du chiffre d'affaires de la profession du traitement thermique hors secteur automobile intégré. Ils se développent pour des séries de pièces mécaniques de dimensions très diverses : depuis les lots unitaires de quelques pièces jusqu'à des séries journalières de quelques dizaines de pièces.

Suivant la complexité de mise au point du traitement et de l'inducteur, les répercussions de ces tailles de lot sur les coûts unitaires peuvent aller de moins de 1 à plus de 100 F.

6. Axes de développement de ces procédés

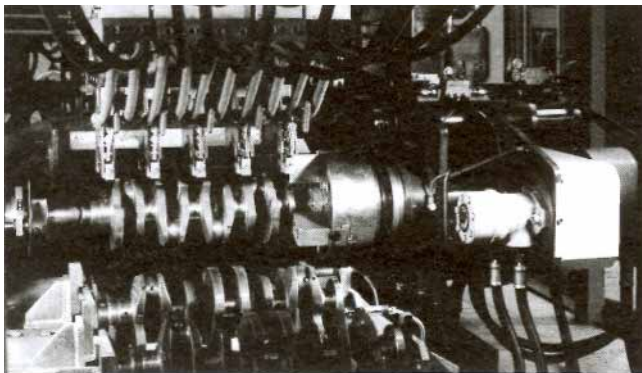
6.1 Durcissements de contour par induction des dentures

La figure 28 illustre les différentes techniques de durcissement par induction utilisées suivant le module de la denture à traiter [32]. Pour les modules suffisamment importants pour permettre un bon couplage en fond de dent, les traitements dent à dent sont couramment mis en œuvre [33].

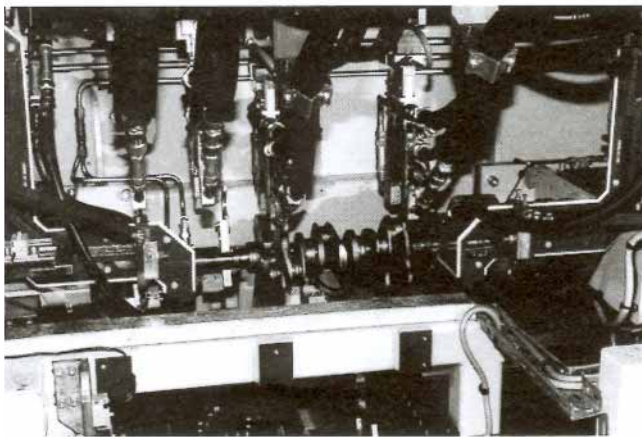
L'adaptation du traitement par induction au durcissement de contour des dentures de modules voisins de 2 à 3, fréquemment utilisées en mécanique (cf. boîtes de vitesses automobiles, ou crémaillères de direction), est un enjeu important en termes de flux de pièces tendu, et d'amélioration de l'environnement d'atelier.

Dans le cas d'une couronne dentée de module m placée dans un inducteur annulaire encerclant de diamètre très voisin, les courants induits se développent à la pointe des dents si la profondeur de pénétration $p < m$, et à la base des dents si $p > m$. D'où l'idée de combiner la moyenne fréquence, pour le préchauffage vers 400 °C et l'austénitisation du creux de dent, et la plus haute fréquence possible pour que l'austénitisation épouse aussi le sommet de dent. On peut aussi réaliser un traitement préalable de trempe et revenu avec chauffage MF sur une profondeur de quelques millimètres, d'une part pour durcir la racine de dent sur une profondeur adéquate (fatigue-flexion de la denture), et d'autre part pour obtenir une réponse plus homogène de la structure lors de la dernière impulsion HF de quelques dixièmes de seconde.

Ce type de traitement a déjà fait l'objet de réalisations industrielles dans le secteur automobile, notamment chez General Motors [34]. Il met en œuvre des générateurs HF et des inducteurs particuliers permettant de dispenser des impulsions brèves de forte puissance (correspondant à des puissances surfaciques de plusieurs kW/cm²).



a traitement des paliers



b traitement des manetons

Figure 26 – Exemple de machines de traitement par induction de vilebrequins automobiles

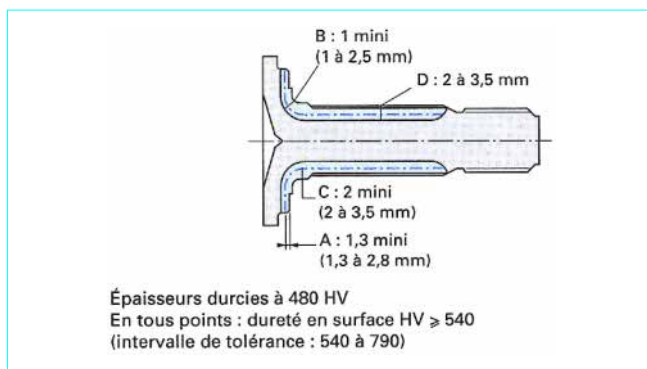


Figure 27 – Spécifications relatives aux épaisseurs durcies par induction sur face d'appui roulement (A), congé de raccordement (B) et cannelures (D), d'une fusée de roue automobile

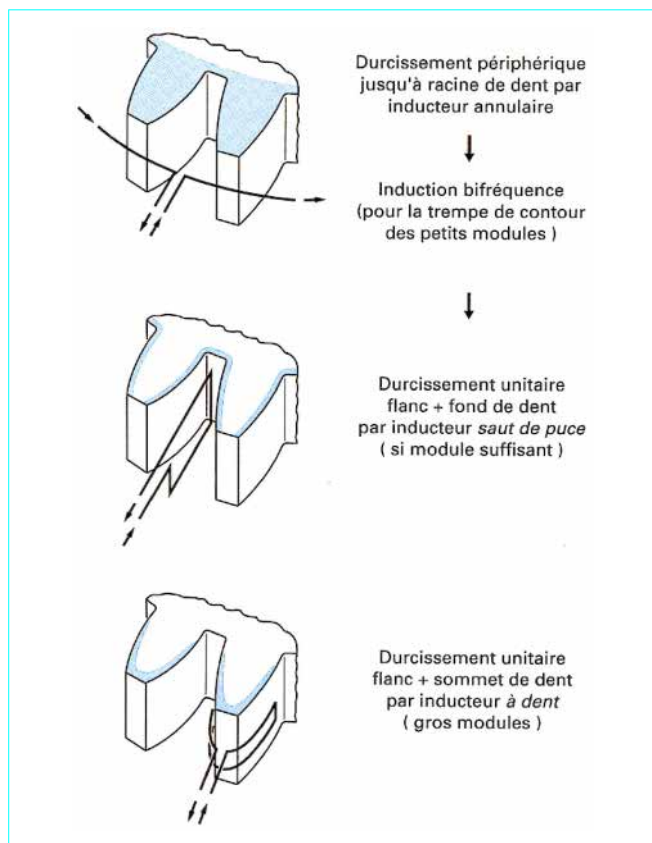


Figure 28 – Techniques de durcissement par induction de denture [32]

6.2 Contrôles en ligne des procédés

6.2.1 Contrôle direct de l'énergie réellement fournie à la pièce

On voit se généraliser la mise en place, sur les installations de grandes séries, de méthodologies de contrôle de process basées sur un suivi systématique – avec traçabilité – de la température de surface traitée, du courant d'anode [29] ou de l'énergie active transmise par l'inducteur à la pièce [31].

On peut espérer des systèmes de contrôle autoadaptatif à base d'enregistrements en temps réel et d'algorithmes de simulation plus ou moins complexes [31].

6.2.2 Mise au point de capteurs de contrôle non destructif

De gros efforts de recherche sont actuellement consentis pour la mise au point de moyens de contrôle non destructif, susceptibles d'alerter en ligne sur les dérives ou les hétérogénéités circumférentielles d'épaisseur durcie : sondes encerclantes (figure 29) ou ponctuelles à courants de Foucault, capteurs pour le suivi de la perméabilité magnétique incrémentale ou du bruit Barkhausen...

Outre la prévention des dérives de process, il devrait également en résulter une limitation des rebuts et des pièces perdues en contrôles destructifs.

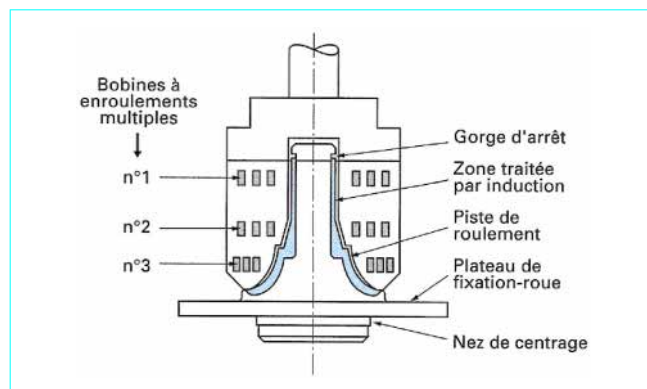


Figure 29 – Contrôle par courants de Foucault de moyeux de roue après traitement par induction (d'après Dodge)

6.3 Conception d'inducteurs assistée par simulation numérique

Il s'agit bien entendu d'inducteurs de géométries complexes, avec concentrateurs de champ pour optimiser les charges thermiques [35].

On imagine bien aussi l'aide de la simulation numérique pour l'optimisation des balayages des faisceaux lasers ou électroniques.

6.4 Reprises de traitement localisées sur pièces difficiles

Ces reprises de traitement pour maîtriser les déformations de pièces difficiles peuvent concerner soit des trempes calibrées sur un mandrin de pièces peu épaisses (par exemple manchons de synchronisation des boîtes de vitesses), soit des pièces massives (couronnes) dont la trempe après cémentation laisserait craindre des déformations irrepreneables. Dans ce dernier cas, on peut faire suivre la cémentation d'un refroidissement lent peu déformant et procéder ensuite à une trempe de contour (par exemple par induction). Un revenu vers 180 °C est alors en général indispensable pour optimiser le couple de caractéristiques en fatigue et résilience [17].

6.5 Intégration industrielle de sources plus flexibles

Il est assez facile d'imaginer un avenir industriel aux traitements localisés réalisés grâce aux trois types de sources : laser en rayonnement infrarouge, bombardement électronique multifaisceau et torche à plasma à arc transféré, pour autant que leur insertion industrielle conduise à des coûts globaux de traitement compétitifs.

Afin de réduire les temps de non-fonctionnement, particulièrement pénalisants dans le cas des investissements élevés d'un équipement laser ou FE, on peut imaginer des modules flexibles se partageant ébauchage, durcissement, et finition assistés par laser en liaison avec un poste CAO [4].

Les torches à plasma à arc transféré (PTA) offrent de larges possibilités de traitements thermiques superficiels, d'une part du fait de la souplesse du dard au niveau densité énergétique et focalisation, d'autre part parce qu'il est facile d'apporter en surface des éléments d'addition permettant de réaliser des alliages ou des réactions favorisant le comportement tribologique du substrat. Des études sont en cours pour examiner l'intérêt de gaz réactifs comme le méthane

ou le gaz carbonique. Enfin, la polyvalence de telles installations PTA pour les traitements avec ou sans refusion, comme pour les rechargements, doit favoriser leur rentabilité en atelier de sous-traitance.

Une alternative économique pour le durcissement de grandes surfaces pourrait être l'emploi de lampes à arc d'une cinquantaine de kW focalisées par larges bandes sur la surface en défilement : on atteindrait ainsi des puissances surfaciques de plus de 3 kW/cm² avec un meilleur coefficient d'absorption du rayonnement et un meilleur rendement qu'une source laser [36].

Finalement, l'adaptabilité des nouvelles sources de traitement superficiel doit tenir compte de l'émergence probable de nouveaux produits, pour ne citer que [4] :

- le durcissement de peau des pièces en alliages légers de l'automobile et de l'aéronautique ;
- les surfaces d'implants en titane résistant à l'usure ;
- l'amélioration de la tenue d'outils de mise en forme à chaud ;
- les pièces de moteurs et turbines devant résister à chaud ;
- les revêtements de réacteurs chimiques à propriétés catalytiques ;
- la réalisation de couches quasi-amorphes sur alliages légers.

7. Conclusions

Il arrive fréquemment lors de la conception d'une pièce mécanique que le choix de la matière soit un compromis entre diverses considérations technico-économiques et que l'on soit obligé de tabler sur certains durcissements localisés pour assurer certains besoins fonctionnels : tenue au matage, en fatigue, à l'usure, tribologie, étanchéité. Il arrive aussi fréquemment que la tenue aux sollicitations en service d'une pièce nécessite des conditions de sévérité plus grandes, par exemple par une meilleure résistance à l'initiation des fissures de fatigue au niveau d'un congé de raccordement.

La trempe après chauffage par induction constitue alors bien souvent la solution la plus pratique et la plus économique pour durcir *au juste nécessaire* une zone superficielle de pièce si cette dernière est réalisée dans un alliage ferreux suffisamment riche en carbone.

Elle permet une localisation facile et précise du durcissement, favorable à la limitation des risques de déformations, et des traitements pièce à pièce reproductibles et automatisés en chaîne de fabrication. La modulation des épaisseurs traitées peut être contrôlée par la forme de l'inducteur et des concentrateurs de champ judicieusement disposés, le choix de la fréquence et de la durée du traitement.

La trempe après chauffage par induction peut procurer à un acier à 0,4 % C peu allié des caractéristiques métallurgiques comparables à celles obtenues par traitements thermochimiques sur des nuances à plus bas carbone mais plus alliées. L'usage de plus fortes teneurs en carbone peut toutefois provoquer des difficultés d'usinage ou nécessiter des opérations de traitement complémentaires comme le revenu.

Globalement, on peut compléter ainsi les atouts du chauffage par induction pour le durcissement superficiel :

- simplicité de l'opération ;
- répétabilité du cycle de traitement sur des séries de pièces ;
- automatisme des opérations supprimant toute main-d'œuvre spécialisée ;
- qualité de surface évitant certaines opérations de finition ;
- absence de modifications structurales et de déformations du cœur de la pièce ;
- productivité élevée liée à la faible inertie thermique, compatible avec l'insertion dans les chaînes de fabrication ;
- grande souplesse d'emploi, notamment en sous-traitance, pour les petites comme les grandes séries ;
- réduction du prix de revient des pièces, d'une part, du fait de l'emploi de nuances moins alliées et, d'autre part, du fait d'une moindre consommation énergétique.

De plus, ces traitements interviennent aux derniers stades de réalisation des pièces et n'affectent donc pas les conditions et coûts de mise en forme, voire de finition.

Traditionnellement réservé à la cémentation, ce type de traitement n'a pas pu encore s'adapter aux besoins capacitaires.

C'est finalement un traitement de choix pour les pièces moyennement sollicitées et simples des industries de l'automobile, du cycle, du machinisme agricole, des transports, de la mécanique générale.

Les techniques de traitement superficiel par faisceau laser et faisceau d'électrons n'atteindront sans doute jamais les développements industriels de l'induction. Elles resteront limitées à des cas de traitements en faibles épaisseurs, très précisément localisés, pour lesquels pourront être économiquement valorisés modulation de puissance surfacique et balayage automatisé du faisceau.

Finalement, en se substituant progressivement aux traitements thermochimiques, longs et d'environnement difficile, les traitements superficiels contribuent par leur souplesse à rompre l'isolement (emplacement, personnel, flux des pièces) de l'opération de traitement au sein des chaînes de fabrication.

Traitements thermique superficiels des aciers

par **Yves DESALOS**
et **Florence LE STRAT**
Ingénieurs chez Renault SA
Docteurs ès sciences

Bibliographie

- [1] *Flame Hardening*. Le durcissement à la flamme ASM Metals Handbook 9^e éd., vol. 4 (Heat Treating) p. 484-506 (1992).
- [2] *Procédés électriques dans les traitements et revêtements de surface*, ch. 6 *Traitements par transformation structurale*. p. 330-61, DOPEE 85, collection. Electra.
- [3] FRÜNGEL (F.). – *Trempe par impulsions*. Journée d'étude ATTT/SFM du 6/3/79, Paris. Tiré à part commun rev. Trait. Therm. et Rev. de Métall., juin-juil. 1979.
- [4] HEUVELMAN (C.J.), KÖNIG (W.), TÖNSHOFF (H.K.), MEIJER (J.), KIRNER (P.K.), RUND (M.), SCHNEIDER (M.F.) et Van SPRANG (I.). – *Surface Treatment Techniques by Laser Beam Machining*. (Techniques de traitement de surface par faisceau laser). Annals of the CIRP, vol. 41, p. 657-66 (1992).
- [5] HICK (A.J.). – *Traitements rapides de durcissement de surface par laser ou faisceau d'électrons*. Rev. Trait. Therm. n° 195 (1985).
- [6] PANZER (S.) et MÜLLER (M.). – *Härten von Oberflächen mit Elektronenstrahlen*. (Durcissement de surface par faisceau d'électrons). Rev. HTM, vol. 43, n° 2, p. 103-11 (1988).
- [7] MORDIKE (B.L.). – *Advances in Surface Treatments*. p. 381, éd. A. NIKU LARI, Pergamon Press, – New York (1987).
- [8] PEYRE (J.P.) et TOURNIER (C.). – *Choix des traitements thermiques superficiels*. Éd. CETIM (1985).
- [9] JEANDIN (M.). – *Traitements par laser et faisceaux d'électrons*. Matériaux et Techniques, p. 15-22, nov.-déc. 1989.
- [10] ROESSLER (D.M.). – *Material and Manufacturing Process*. n° 4, p. 285 (1989).
- [11] MACINTYRE (R.M.). – *Laser hard-surfacing of turbine blade shroud interlocks*. (Durcissement superficiel par laser des fixations d'ailettes de turbine). Conférence ASM « Lasers in Materials Processing », Los Angeles, p. 230 (1983).
- [12] DEKUMBIS (R.). – *Utilisation du laser dans les techniques de traitement de surfaces*. Technische Rundschau, vol. 81, n° 6, p. 32-4 et Revue Technique SULZER n° 1/90, p. 27 (1989).
- [13] TAKAGI (S.). – *Industrial Laser Annual Handbook*. 1988, p. 84. Éd. D. BELFORTE, Pennwell Books, Tulsa, OK, USA (1988).
- [14] EL HAIK (R.). – *Caractéristiques attendues du traitement thermique par induction*. Rev. Trait. Therm., n° 123, p. 45-8 (1978).
- [15] WALKER (E.D.). – *Beneficial residual stresses in induction hardened parts*. (Effets bénéfiques des contraintes résiduelles dans les pièces durcies par induction). Metal Progress, sept. 1981.
- [16] HAYASHI (K.) et NATSUME (Y.). – *Influence de la profondeur durcie et des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue des matériaux trempés par induction*. J. of the Soc. of Mat. Sc. Japon, vol. 8, n° 195 (1969).
- [17] MARTIN (M.). – *Le traitement par induction : propriétés d'emploi*. Journée plénière ATTT du 16/12/94 CNIT La Défense, publ. dans rev. Trait. Therm. 280, p. 29-32 (1995).
- [18] GLAUBITZ (J.). – VDI Zeitschrift n° 16 (1958).
- [19] SAUTER (J.), SCHMIDT (I.) et SCHULZ (M.). – *Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder*. (Principaux facteurs affectant la tenue de dentures sollicitées). Rev. HTM, n° 45, 2, p. 98-104 (1990).
- [20] SCHÄFER (V.A.) et EHL (J.). – *Eigenstressungen an der Oberfläche begrenzter Induktiv gehärteter Stahlzylinder*. (Contraintes superficielles après durcissement par induction de cylindres en acier). Arch. Eisenhüttenwesen, 39, n° 2, p. 167-70 (1968).
- [21] CHABROL (C.) et MERRIEN (P.). – *Durcissement superficiel des aciers par faisceau laser*. Rev. de Métall., CIT, p. 491-506, juin 1989.
- [22] *Bases de choix des aciers pour durcissement par trempe après chauffage superficiel*. OTUA (1985).
- [23] VOLMI (M.) et EL HAIK (R.). – *Emploi des aciers au carbone durcis par induction dans les pièces de transmission, suspension, direction*. Rev. Trait. Therm. n° 128, p. 51-8 (1978).
- [24] MULOT (A.) et BADEAU (J.P.). – *Influence de la structure initiale et de la composition sur les caractéristiques des couches durcies obtenues par trempe superficielle, BE et laser*. Rev. Trait. Therm. n° 136, et Rev. de Métall. n° 7, p. 489-505 (1979).
- [25] ORLICH (J.), ROSE (A.) et WIEST (P.). – *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle*. (Atlas pour le traitement thermique des aciers), vol. 3, Max Planck Institut, Düsseldorf (1973).
- [26] DESALOS (Y.), GIUSTI (J.) et LOMBRY (R.). – *Étude des traitements thermiques avec chauffage rapide pour produits longs en acier*. Rapport IRSID RE 1111, mai 1984.
- [27] VAMVACOUSSIS (A.), SCHMITT (G.), METAUER (G.) et GANTOIS (M.). – *Étude de la structure et de la morphologie des couches superficielles d'aciers au carbone trempés après chauffage par induction*. Trait. Therm. n° 88, oct. 1974.
Morphologie et structure de la martensite formée par trempe par induction dans un acier XC 42. Mémoires Sc. de la Rev. de Métall., déc. 1976.
- [28] LONGEOT (O.) et DELALEAU (C.). – *Simulation numérique de procédés de traitement par induction*. Journée plénière ATTT du 16/12/94 CNIT La Défense, publ. dans revue Trait. Therm. 280, p. 33-47 (1995).
- [29] NEUMANN (I.) et HAENNY (L.). – *Trempe par induction : courant d'anode et profondeur de chauffe*. Rev. Trait. Therm. n° 273, p. 57-61 (1994).
- [30] DRENKER (A.). – *Adaptive Control in Laser Transformation Hardening*. (Contrôle adaptatif en durcissement laser). Proc. ECLAT, Coburg, vol. 1, p. 283-90 (1990).
- [31] LANGEOT (O.), BARRIERE (E.) et BOURDET (E.). – *Le contrôle et la qualité en traitement par induction*. Rev. Trait. Therm., n° 261, p. 47-54 (1993).
- [32] CRIQUI (B.) et GUIMIER (A.). – *Règles et possibilités de mise en œuvre de la technique du traitement thermique superficiel par induction pour la fabrication de pièces mécaniques*. Journée ATTT du 24 nov. 1989.
- [33] LEROUX (C.). – *Traitements superficiels des engrenages par induction*. Journée plénière ATTT du 16/12/94 CNIT La Défense, publ. dans rev. Trait. Therm. 282, p. 61-7 (1995).
- [34] LASDAY (S.B.). – *Automated Multi Frequency Multi Cycle Induction Heat Treating of Gears with a new Facility*. (Nouvelle installation TOCCO de traitement thermique de pignons par induction multifréquence). Rev. Industrial Heating, vol. LVIII, n° 5, mai 1991.
- [35] HANISCH (G.) et KNECHT (A.). – *Essai d'une méthode numérique de calcul pour optimiser les inducteurs de vilebrequin*. Rev. HTM 46, n° 2, p. 74-9 (1991).

[36] RUND (M.) et MEYER-KOLBE (C.). – *Lampe contra laser*. (Lampe et laser). Verlag Moderne Industrie, n° 10, p. 48-59 (1991).

Ouvrages généraux

[37] *Procédés électriques dans les traitements et revêtements de surface*. DOPEE 85 et 95, collect. ELECTRA, librairie Lavoisier, Paris.

[38] ORFEUIL (M.). – *Le chauffage par induction électromagnétique*. Collection EDF (1980).

[39] SEMIATIN (S.L.) et STUTZ (D.E.). – *Induction Heat Treatment of Steel*. American Society for Metals, Metals Park, Ohio 44073 (1986).

[40] *Arc plasma processes : a maturing technology in industry*. (Les processus par plasma : une technologie industrielle à maturité). Ouvrage réalisé par le GT « Plasma processes » de l'UIE et publ. dans *Arc Plasma rev.*, International Union for Electroheat (1988).

[41] CONSTANT (A.) et HENRY (G.). – *Les principes de base du traitement des aciers*. PYC éd. Paris (1986).

[42] ORLICH (J.) and co. – *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle*. MPI, TU Berlin, Band 3 (1973) et Band 4 (1976).

[43] *Metals Handbook*. Vol. 4, ASM, 9^e édition.

Dans les techniques de l'ingénieur

[44] PANTELIS (D.). – *Traitements superficiels par faisceaux à haute densité d'énergie*. M 1 240, traité Matériaux métalliques, juil. 1993.

[45] BARRALIS (G.). – *Précontraintes et traitements superficiels*. M 1 180, traité Matériaux métalliques (1999).

[46] SABONNADIÈRE (J.C.). – *Calcul des champs électromagnétiques*. D 3 020, traité Génie électrique, déc. 1988.

Normalisation

Association française de normalisation (AFNOR)

NF A 02-054 Traitement de durcissement par trempe après chauffage superficiel par induction.

NF A 04-203 Produits en aciers. Détermination de la profondeur conventionnelle de trempe après chauffage superficiel.

NF A 35-563 Aciers spéciaux aptes aux traitements thermiques pour trempe après chauffage superficiel.

Norme constructeurs automobiles français CES/SD S.0807 réf. 02.60.203. Trempe à profondeur imposée après chauffage par induction.

Les pôles de compétences

Laboratoires et plate-formes d'essais publics et privés



Constructeurs

Constructeurs en chauffage par induction représentés en France						
Constructeur	Fusion	Forge	Traitement thermique	Cuves, réacteurs	Divers	Société étrangère représentée
ABB Industries	x	x	x			ABB (Suède)
ACES		x		x	x	
AEG France		x	x			AEG Elotherm (Allemagne)
Ajax Magnéthermic	x	x	x			Ajax Magnethermic (USA)
Alma Parens		x	x		x	GH ELIN (Espagne/Autriche)
CELES			x		x	
CFEI			x		x	
Danieli Rotelec					x	Danieli (Italie)
ELVA France			x		x	ELVA (Norvège) FDF (Allemagne)
EPF	x	x				Calamari (Italie)
Inductothermie	x	x	x	x	x	Inductotherm Corporation (USA)
Marty Equipements	x	x	x		x	EMA (Allemagne)
Ets Moeller	x	x	x		x	Otto Junker (Allemagne)
RDI	x	x	x		x	Elind (Italie)
SAEM SAET		x				Newelco (Grande-Bretagne)
SCLE				x		
SGD Sté de Gestion et de Diffusion Division CIRP génie chimique				x		
SNPE Ingénierie				x	x	
SODALGO	x	x	x		x	
Techniques Industrielles	x					
Thermique Automation		x				Induction SNC (Italie)

Traitements thermique superficiels des aciers

Bibliographie

- [1] *Flame Hardening*. Le durcissement à la flamme ASM Metals Handbook 9^e éd., vol. 4 (Heat Treating) p. 484-506 (1992).
- [2] *Procédés électriques dans les traitements et revêtements de surface*, ch. 6 *Traitements par transformation structurale*. p. 330-61, DOPEE 85, collection. Electra.
- [3] FRÜNGEL (F.). – *Trempe par impulsions*. Journée d'étude ATTT/SFM du 6/3/79, Paris. Tiré à part commun rev. Trait. Therm. et Rev. de Métall., juin-juil. 1979.
- [4] HEUVELMAN (C.J.), KÖNIG (W.), TÖNSHOFF (H.K.), MEIJER (J.), KIRNER (P.K.), RUND (M.), SCHNEIDER (M.F.) et Van SPRANG (I.). – *Surface Treatment Techniques by Laser Beam Machining*. (Techniques de traitement de surface par faisceau laser). Annals of the CIRP, vol. 41, p. 657-66 (1992).
- [5] HICK (A.J.). – *Traitements rapides de durcissement de surface par laser ou faisceau d'électrons*. Rev. Trait. Therm. n° 195 (1985).
- [6] PANZER (S.) et MÜLLER (M.). – *Härten von Oberflächen mit Elektronenstrahlen*. (Durcissement de surface par faisceau d'électrons). Rev. HTM, vol. 43, n° 2, p. 103-11 (1988).
- [7] MORDIKE (B.L.). – *Advances in Surface Treatments*. p. 381, éd. A. NIKU LARI, Pergamon Press, – New York (1987).
- [8] PEYRE (J.P.) et TOURNIER (C.). – *Choix des traitements thermiques superficiels*. Éd. CETIM (1985).
- [9] JEANDIN (M.). – *Traitements par laser et faisceaux d'électrons*. Matériaux et Techniques, p. 15-22, nov.-déc. 1989.
- [10] ROESSLER (D.M.). – *Material and Manufacturing Process*. n° 4, p. 285 (1989).
- [11] MACINTYRE (R.M.). – *Laser hard-surfacing of turbine blade shroud interlocks*. (Durcissement superficiel par laser des fixations d'ailettes de turbine). Conférence ASM « Lasers in Materials Processing », Los Angeles, p. 230 (1983).
- [12] DEKUMBIS (R.). – *Utilisation du laser dans les techniques de traitement de surfaces*. Technische Rundschau, vol. 81, n° 6, p. 32-4 et Revue Technique SULZER n° 1/90, p. 27 (1989).
- [13] TAKAGI (S.). – *Industrial Laser Annual Handbook*. 1988, p. 84. Éd. D. BELFORTE, Pennwell Books, Tulsa, OK, USA (1988).
- [14] EL HAIK (R.). – *Caractéristiques attendues du traitement thermique par induction*. Rev. Trait. Therm., n° 123, p. 45-8 (1978).
- [15] WALKER (E.D.). – *Beneficial residual stresses in induction hardened parts*. (Effets bénéfiques des contraintes résiduelles dans les pièces durcies par induction). Metal Progress, sept. 1981.
- [16] HAYASHI (K.) et NATSUME (Y.). – *Influence de la profondeur durcie et des contraintes résiduelles sur la résistance à la fatigue des matériaux trempés par induction*. J. of the Soc. of Mat. Sc. Japon, vol. 8, n° 195 (1969).
- [17] MARTIN (M.). – *Le traitement par induction : propriétés d'emploi*. Journée plénière ATTT du 16/12/94 CNIT La Défense, publ. dans rev. Trait. Therm. 280, p. 29-32 (1995).
- [18] GLAUBITZ (J.). – VDI Zeitschrift n° 16 (1958).
- [19] SAUTER (J.), SCHMIDT (I.) et SCHULZ (M.). – *Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder*. (Principaux facteurs affectant la tenue de dentures sollicitées). Rev. HTM, n° 45, 2, p. 98-104 (1990).
- [20] SCHÄFER (V.A.) et EHL (J.). – *Eigenspannungen an der Oberfläche begrenzter Induktiv gehärteter Stahlzylinder*. (Contraintes superficielles après durcissement par induction de cylindres en acier). Arch. Eisenhüttenwesen, 39, n° 2, p. 167-70 (1968).
- [21] CHABROL (C.) et MERRIEN (P.). – *Durcissement superficiel des aciers par faisceau laser*. Rev. de Métall., CIT, p. 491-506, juin 1989.
- [22] *Bases de choix des aciers pour durcissement par trempe après chauffage superficiel*. OTUA (1985).
- [23] VOLMI (M.) et EL HAIK (R.). – *Emploi des aciers au carbone durcis par induction dans les pièces de transmission, suspension, direction*. Rev. Trait. Therm. n° 128, p. 51-8 (1978).
- [24] MULOT (A.) et BADEAU (J.P.). – *Influence de la structure initiale et de la composition sur les caractéristiques des couches durcies obtenues par trempe superficielle, BE et laser*. Rev. Trait. Therm. n° 136, et Rev. de Métall. n° 7, p. 489-505 (1979).
- [25] ORLICH (J.), ROSE (A.) et WIEST (P.). – *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle*. (Atlas pour le traitement thermique des aciers), vol. 3, Max Planck Institut, Düsseldorf (1973).
- [26] DESALOS (Y.), GIUSTI (J.) et LOMBRY (R.). – *Étude des traitements thermiques avec chauffage rapide pour produits longs en acier*. Rapport IRSID RE 1111, mai 1984.
- [27] VAMVACOUISSIS (A.), SCHMITT (G.), METAUER (G.) et GANTOIS (M.). – *Étude de la structure et de la morphologie des couches superficielles d'aciers au carbone trempés après chauffage par induction*. Trait. Therm. n° 88, oct. 1974.
Morphologie et structure de la martensite formée par trempe par induction dans un acier XC 42. Mémoires Sc. de la Rev. de Métall., déc. 1976.
- [28] LONGEOT (O.) et DELALEAU (C.). – *Simulation numérique de procédés de traitement par induction*. Journée plénière ATTT du 16/12/94 CNIT La Défense, pub. dans revue Trait. Therm. 280, p. 33-47 (1995).
- [29] NEUMANN (I.) et HAENNY (L.). – *Trempe par induction : courant d'anode et profondeur de chauffe*. Rev. Trait. Therm. n° 273, p. 57-61 (1994).
- [30] DRENKER (A.). – *Adaptive Control in Laser Transformation Hardening*. (Contrôle adaptatif en durcissement laser). Proc. ECLAT, Coburg, vol. 1, p. 283-90 (1990).
- [31] LANGEOT (O.), BARRIERE (E.) et BOURDET (E.). – *Le contrôle et la qualité en traitement par induction*. Rev. Trait. Therm., n° 261, p. 47-54 (1993).
- [32] CRIQUI (B.) et GUIMIER (A.). – *Règles et possibilités de mise en œuvre de la technique du traitement thermique superficiel par induction pour la fabrication de pièces mécaniques*. Journée ATTT du 24 nov. 1989.
- [33] LEROUX (C.). – *Traitements superficiels des engrenages par induction*. Journée plénière ATTT du 16/12/94 CNIT La Défense, publ. dans rev. Trait. Therm. 282, p. 61-7 (1995).
- [34] LASDAY (S.B.). – *Automated Multi Frequency Multi Cycle Induction Heat Treating of Gears with a new Facility*. (Nouvelle installation TOCCO de traitement thermique de pignons par induction multifréquence). Rev. Industrial Heating, vol. LVIII, n° 5, mai 1991.
- [35] HANISCH (G.) et KNECHT (A.). – *Essai d'une méthode numérique de calcul pour optimiser les inducteurs de vilebrequin*. Rev. HTM 46, n° 2, p. 74-9 (1991).
- [36] RUND (M.) et MEYER-KOLBE (C.). – *Lampe contra laser*. (Lampe et laser). Verlag Moderne Industrie, n° 10, p. 48-59 (1991).

Ouvrages généraux

- [37] *Procédés électriques dans les traitements et revêtements de surface*. DOPEE 85 et 95, collect. ELECTRA, librairie Lavoisier, Paris.
- [38] ORFEUIL (M.). – *Le chauffage par induction électromagnétique*. Collection EDF (1980).
- [39] SEMIATIN (S.L.) et STUTZ (D.E.). – *Induction Heat Treatment of Steel*. American Society for Metals, Metals Park, Ohio 44073 (1986).
- [40] *Arcplasma processes : a maturing technology in industry*. (Les processus par plasma : une technologie industrielle à maturité). Ouvrage réalisé par le GT « Plasma processes » de l'UIE et publ. dans Arc Plasma rev., International Union for Electroheat (1988).
- [41] CONSTANT (A.) et HENRY (G.). – *Les principes de base du traitement des aciers*. PYC éd. Paris (1986).
- [42] ORLICH (J.) and co. – *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle*. MPI, TU Berlin, Band 3 (1973) et Band 4 (1976).
- [43] *Metals Handbook*. Vol. 4, ASM, 9^e édition.

Dans les techniques de l'ingénieur

- [44] PANTELIS (D.). – *Traitements superficiels par faisceaux à haute densité d'énergie*. M 1 240, traité Matériaux métalliques, juil. 1993.
- [45] BARRALIS (G.), CASTEX (L.) et MAEDER (G.). – *Précontraintes et traitements superficiels*. M 1 180, traité Matériaux métalliques (1999).
- [46] SABONNADIÈRE (J.C.) et COULOMB (J.L.). – *Calcul des champs électromagnétiques*. D 3 020, traité Génie électrique, déc. 1988.

Thèses

<http://www.sudoc.abes.fr>

- HOUZÉ (M.). – *Influence des traitements thermiques sur le Pouvoir Thermoélectrique des aciers de cuve [Texte imprimé] : effet des évolutions microstructurales des zones fortement ségréguées*. Institut national des sciences appliquées (Lyon) (2002).
- PASSERAT (S.). – *Comportement tribologique d'aciers et d'alliages de titane renforcés par traitements superficiels en glissement et en fretting*. Bordeaux (2000).

Normalisation

Association française de normalisation (AFNOR)

<http://www.afnor.fr>

NF A 04-203 Produits en aciers. Détermination de la profondeur conventionnelle de trempe après chauffage superficiel.

NF A 35-563 Aciers spéciaux aptes aux traitements thermiques pour trempe après chauffage superficiel. Qualités



Constructeurs

Liste non exhaustive

Constructeurs en chauffage par induction représentés en France						
Constructeur	Fusion	Forge	Traitement thermique	Cuves, réacteurs	Divers	Société étrangère représentée
ABB Industries http://www.abb.com/fr	x	x	x			ABB (Suède)
ACES		x		x	x	
Alma Parens		x	x		x	GH ELIN (Espagne/Autriche) http://www.ghe.es
CELES http://www.celes.fr			x		x	
CFEI			x		x	
Danieli Rotelec					x	Danieli (Italie) http://www.danielicorp.com
Inductothermie http://www.inductotherm.com	x	x	x	x	x	Inductotherm Corporation (USA)
Ets Moeller	x	x	x		x	Otto Junker (Allemagne) http://www.otto-junker.de
RDI	x	x	x		x	Elind (Italie)
SAEM SAET http://www.saet.it		x				Newelco (Grande-Bretagne) http://www.newelco.co.uk/
SNPE Ingénierie http://www.snpe.com				x	x	
SODALGO	x	x	x		x	
Thermique Automation		x				Induction SNC (Italie) http://www.chierinet.it/~inducti0/