

# IMPACT DES PROCÉDES DE FABRICATION SUR LES PROPRIÉTÉS DES ROUES POLAIRES

Il existe de nombreux articles traitant de l'influence des procédés de fabrication sur les propriétés magnétiques des aciers, en particulier l'effet des différentes techniques de découpage et d'assemblage des tôles (on trouvera un état de l'art sur ce sujet dans [2]). La majorité des études portent, non pas sur des objets massifs (cas des roues polaires), mais sur des tôles laminées. Ainsi, l'effet du forgeage sur les propriétés électromagnétiques a très peu été étudié (seul un article évoque le sujet [27]). Il existe, par contre, de nombreux travaux traitant, d'une part, de l'effet du forgeage sur la microstructure des aciers et, d'autre part, du lien entre la microstructure et les propriétés électromagnétiques des aciers. Un intérêt tout particulier va donc être porté sur l'effet des procédés de fabrication sur la microstructure des aciers de compositions similaires à celle de l'acier des roues polaires ainsi que sur les relations existant entre la microstructure et les propriétés électromagnétiques de ces aciers.

## II.1. Microstructure des aciers

### II.1.1. Généralités

Si de la matière en fusion refroidit très lentement, elle a naturellement tendance à s'organiser selon la structure la plus favorable énergétiquement. Elle forme alors un réseau appelé cristal. Un solide cristallin est un arrangement tridimensionnel d'atomes assimilés à des sphères dures. Cet arrangement peut être plus ou moins complexe et compact. Ainsi, le fer pur peut prendre différentes formes allotropiques, en particulier la **ferrite**  $\alpha$  (stable jusqu'à 912°C, magnétique jusqu'à 769°C) et l'**austénite**  $\gamma$  (stable de 912°C à 1394°C). Lorsque le fer est associé à des éléments d'alliages, une forme allotropique ou l'autre peut être favorisée (Figure 22).

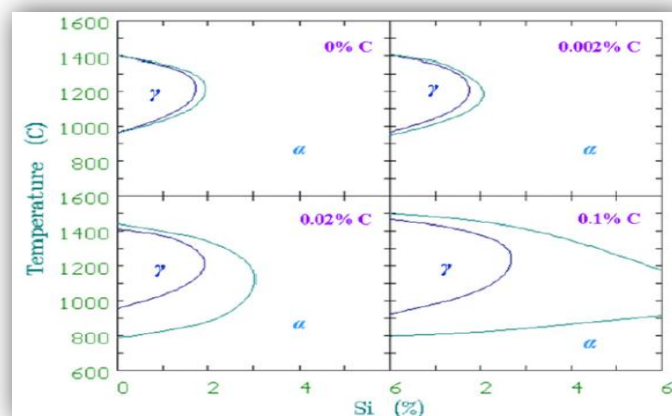
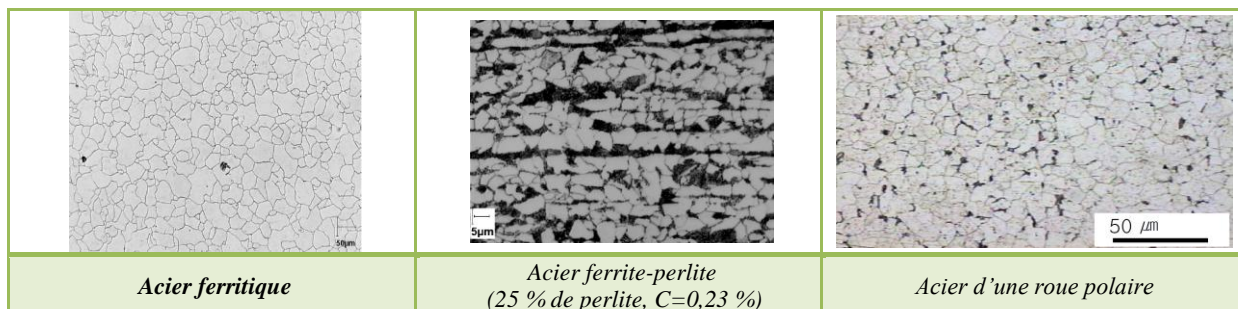


Figure 22 : Effet de la teneur en carbone sur un alliage fer-silicium [28]

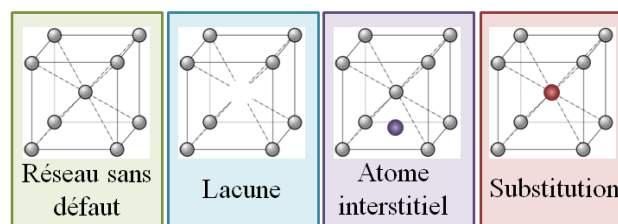
Les alliages fer-carbone forment la famille des aciers (dans le cas  $C < 2,11\%$ ). Le carbone étant peu soluble dans la ferrite, il forme avec le fer un composé défini nommé cémentite ( $Fe_3C$ ). Les phases les plus courantes d'un acier à température ambiante sont la ferrite, la cémentite et la perlite (structure lamellaire de ferrite et de cémentite), et, plus rarement la bainite et la martensite (si la vitesse de refroidissement est moyenne ou rapide, donc sans diffusion). Toutes ces structures se forment **à partir d'austénite** stable à haute température se transformant au cours du refroidissement. La phase ferrite est constituée de fer  $\alpha$  avec très peu de carbone en solution solide (et de petites quantités d'atomes de substitution comme le manganèse ou le silicium). Au-delà de 0,02 % de carbone, on trouve de la perlite (Figure 23) [29]. L'acier des roues polaires est très majoritairement **ferritique** avec de petites quantités de **perlite**. On se focalisera donc sur les études de ce type d'acier.



*Figure 23 : Micrographies de différents aciers ( [30], Valeo)*

### II.1.2. Défauts cristallins

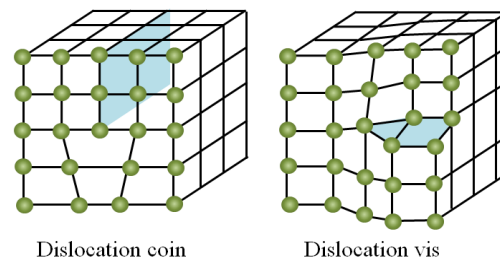
A la complexité de la microstructure des aciers s'ajoutent de nombreux types de défauts dont les principaux vont être rappelés [31][32]. On distingue tout d'abord l'ensemble des défauts ponctuels (à l'échelle atomique) constitué par les **lacunes** dans le réseau cristallin, les **atomes interstitiels** et les **substitutions** d'un atome par un autre (Figure 24). Ces défauts n'ont pas d'impact direct sur les propriétés physiques du matériau mais ils interfèrent avec d'autres défauts ce qui leur confèrent un rôle indirect sur les propriétés.



*Figure 24 : Représentation schématique des défauts de microstructure ponctuels*

Il existe deux types de défauts linéaires (1D) à savoir les **dislocations** et les **fautes d'empilement**. Un intérêt particulier est porté aux dislocations car c'est le mouvement de ce défaut qui est à l'origine de la plasticité des matériaux métalliques. Une dislocation est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline (Figure 25). Sous l'effet de contraintes extérieures, ces dislocations glissent de proche en proche. Ainsi, un matériau

dont les dislocations sont bloquées par un mécanisme ou un autre sera macroscopiquement dur. Notons qu'une lacune dans le réseau cristallin ralentit une dislocation ce qui durcit le matériau.



*Figure 25 : Représentation schématique des dislocations*

On distingue deux types de défauts dans le plan (2D) : les **macles** et les **joints de grains**. Le maillage est un mode de déformation qui s'ajoute aux glissements des dislocations. Il s'agit d'un système de déformations plus complexe car il met en jeu toute une tranche de cristal qui bascule dans une nouvelle orientation. Ce processus permet de relâcher les contraintes engendrées par les hétérogénéités de déformation. Les joints de grains sont quant à eux un empilement de dislocations séparant les cristaux dans un même solide polycristallin. C'est une zone de grand désordre dans laquelle les défauts s'éliminent et un obstacle sur lequel butent les dislocations. Les joints de grains sont directement liés à un paramètre très important de la microstructure des matériaux cristallins, à savoir la **taille de grains**.

Enfin les **précipités** sont des défauts tridimensionnels (3D) dont l'effet sur les propriétés du matériau est lié à sa cohérence avec le réseau cristallographique qui l'entoure. On distingue ainsi les précipités cohérents (épitaxie entre les réseaux cristallographiques) et incohérents. Parmi les défauts tridimensionnels, on compte aussi les porosités formées par des bulles de gaz par exemple.

Les propriétés des aciers sont dépendantes des phases en présence, de la taille des grains, des atomes interstitiels (carbone), de substitution (manganèse, silicium, phosphore, chrome, cuivre,...), des précipités (carbures, nitrures) et du taux d'érouissage (assimilable à la concentration de dislocations) [30]. En outre la microstructure des aciers (nature des phases, proportion, dimension) dépend des conditions de transformation de phases. Du fait de ces interactions complexes, il n'existe pas de relation simple et linéaire entre les propriétés et la composition chimique d'un acier.

### II.1.3. Caractérisation de la plasticité

Il existe un certain nombre d'essais permettant de connaître les propriétés mécaniques d'un matériau (essai de traction, de compression,..). Ces essais normalisés permettent de donner les tendances du comportement de la matière lors du forgeage par exemple (déformation plastique de la matière à chaud). Prenons l'exemple de l'essai de traction monotone qui consiste à allonger de manière continue un échantillon de matériau (éprouvette) de dimensions données (longueur et section initiales  $L_0$  et  $S_0$ ) et d'enregistrer la force  $F$  (en Newton N) nécessaire pour produire cet allongement  $\Delta L$  ( $\Delta L = L - L_0$ ,  $L$  la longueur de l'éprouvette au cours de l'essai). Expérimentalement, on peut

représenter la force  $F$  en fonction de l'allongement  $\Delta L$ . Cette courbe apporte des informations intéressantes mais est dépendante des conditions expérimentales. On lui préfère donc le diagramme conventionnel représentant la **contrainte**  $\sigma$  ( $\sigma=F/S_0$ ) en fonction de la **déformation**  $\varepsilon$  ( $\varepsilon= \Delta L/ L_0$ ). Ce diagramme, qui est propre au matériau considéré, permet alors de déterminer entre autres la **limite d'élasticité**  $R_E$  et la **résistance mécanique**  $R_M$  du matériau [33]. Notons que lorsque la matière est travaillée à froid, cette courbe s'achève avec la rupture du matériau. Par contre, à chaud, la matière peut s'étirer et la courbe se poursuit alors par un domaine stationnaire.

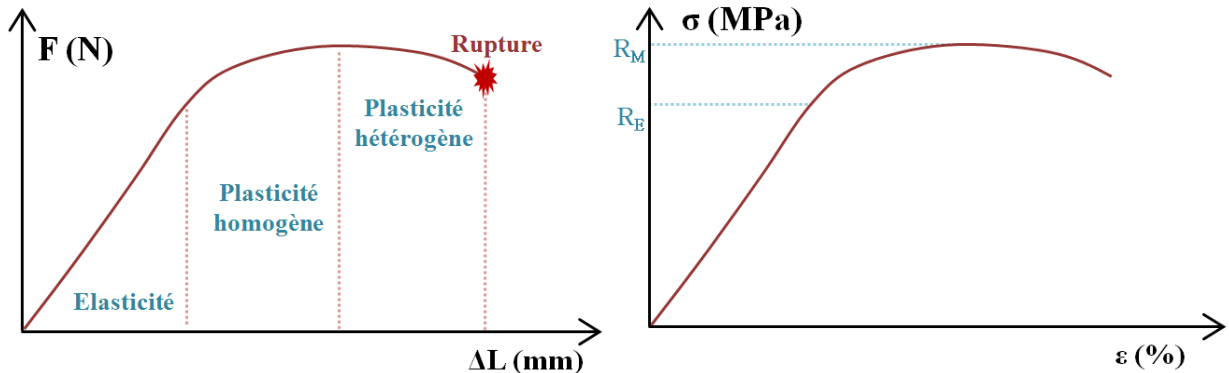


Figure 26 : Diagrammes expérimental et conventionnel types d'un essai de traction monotone

Ces généralités vont permettre de mieux aborder la suite du développement qui traitera le cas particulier des aciers ferritiques avec éventuellement une faible proportion de perlite.

## II.2. Procédé de fabrication et microstructure

### II.2.1. Forgeage à chaud des aciers ferritiques

Le domaine de déformation à chaud est défini de manière empirique par  $T/T_f > 0,5$ ,  $T$  désignant la température du matériau lors du procédé de mise en forme (de l'ordre de  $1200^\circ\text{C}$  dans le cas de la roue polaire) et  $T_f$  sa température de fusion commençante ( $T_{f(\text{fer pur})} = 1538^\circ\text{C}$ ). A haute température, la structure du métal va notablement évoluer pendant et après les séquences de déformations plastiques. Pour décrire convenablement le comportement de déformation des aciers ferritiques à haute température, il faut au moins considérer le mécanisme d'**écrouissage** et la combinaison de la **restauration dynamique** et de la **recristallisation** (c.f. II.2.2.A) [34].

L'effet du forgeage à chaud sur un matériau est complexe car ce procédé, en plus de contraindre la pièce de façon hétérogène, provoque de forts gradients de température et de rapides variations de celle-ci au cours du temps. Or, la réponse du matériau (écrouissage, restauration et/ou recristallisation) est davantage déterminée par ses antécédents thermiques et mécaniques que par les valeurs instantanées de température et de vitesse de déformation [35]. En outre, les mécanismes de réponse à la déformation peuvent se produire pendant et/ou après les séquences de déformations

plastiques. En pratique, il faut prendre en compte l'ensemble de ces phénomènes pour connaître les propriétés finales de la pièce.

La pièce forgée peut ainsi présenter une inhomogénéité de microstructure importante. Il est donc primordial de connaître les facteurs déterminant la microstructure finale d'une pièce forgée. L'objectif ici n'est pas d'introduire des équations de modélisation (dont on trouvera une synthèse dans [3]) mais d'apporter une description qualitative du comportement de l'acier ferritique afin de dégager des tendances et d'expliquer d'éventuelles observations postérieures.

## II.2.2. Effet du forgeage sur la microstructure

### II.2.2.A. EFFET DE LA DEFORMATION

**Description des mécanismes :** La déformation plastique d'un métal modifie sa structure et ses propriétés mécaniques : on parle d'**écrouissage**. Ce phénomène est dû à l'augmentation de la densité de dislocations. Cette augmentation est modérée par la **restauration dynamique**. Il s'agit de l'élimination d'une partie des dislocations, soit au cours d'annihilations par paire (mécanisme qui annule deux dislocations), soit par absorption dans les joints de grains. Simultanément, les dislocations s'organisent en sous-joints subdivisant les grains initiaux en sous-grains (Figure 27, I 1, 2 et 3). La taille moyenne des sous-grains, de l'ordre de quelques micromètres, augmente lorsque la vitesse de déformation diminue ou lorsque la température augmente. Ainsi, les transformations microstructurales dans le domaine des déformations faibles ou modérées (i.e. jusqu'au maximum de la courbe contrainte-déformation) résultent d'un équilibre entre l'écrouissage (création de dislocations) et la restauration dynamique (réarrangement et annihilation des dislocations). Notons que la **contrainte** est proportionnelle à la racine de la **densité de dislocations**  $\sqrt{\rho}$  et inversement proportionnelle à la **taille des cristaux** (grains ou sous grains). Elle est également dépendante de la **structure du matériau** à l'instant considéré [36].

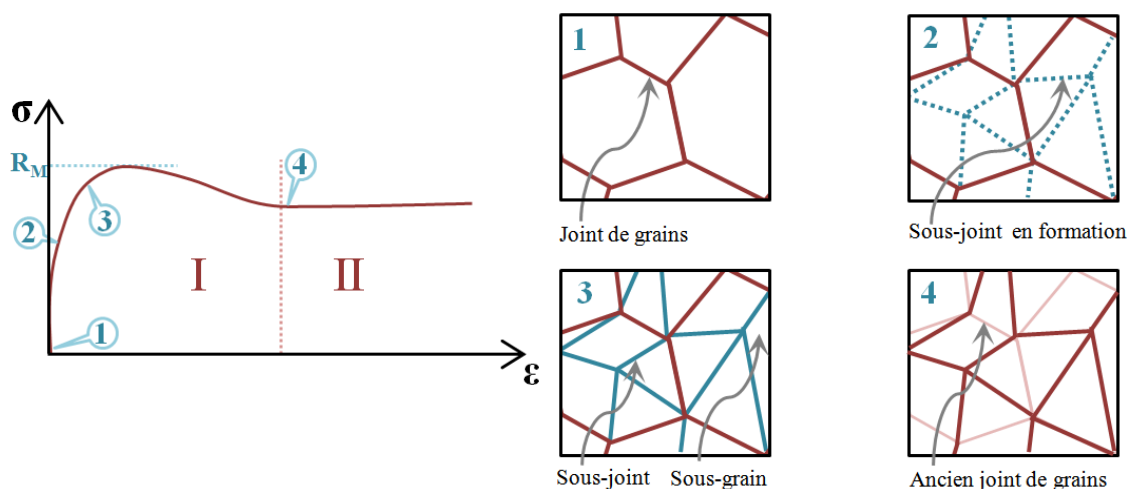
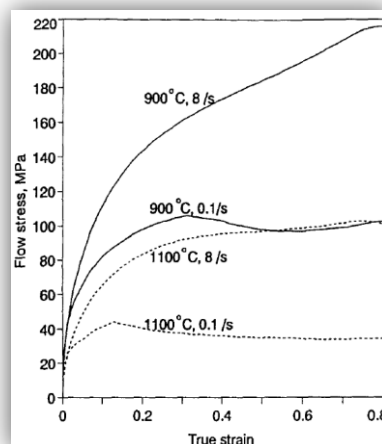


Figure 27 : Représentation schématique des évolutions de microstructure liées aux mécanismes de plasticité

La recristallisation (Figure 27, II, 4) s'opère lorsque l'on atteint une déformation critique qui est fonction du taux d'écroutissage et de la température [34]. Au cours de la déformation, une partie des sous-joints formés durant la phase d'écroutissage-restauration dynamique se transforme progressivement en joints en raison des rotations cristallines différentes des sous-grains adjacents : on parle de **recristallisation dynamique continue**. Il existe un second mécanisme générateur de nouveaux grains aux grandes déformations appelé **recristallisation dynamique géométrique**. Lors de la déformation, les grains initiaux changent de forme et l'aire de joints par unité de volume augmente. Lorsque l'une au moins de leurs dimensions devient suffisamment faible, les grains peuvent subir des « pincements » locaux conduisant à leur fragmentation [36].

Pour résumer, si une déformation moyenne est appliquée à un acier ferritique, la densité de dislocations a tendance à augmenter mais de façon modérée. Par contre, si une déformation importante est appliquée, le matériau recristallise ce qui occasionne une diminution de la densité de dislocations et de la taille des grains. Sans avoir de données précises sur le forgeage de la roue polaire et sur la microstructure de la matière première, il est tout de même possible d'imaginer que la déformation locale du matériau diffère d'un point à un autre (par exemple, la déformation du matériau de la griffe par rapport à la déformation du matériau du plateau). Cependant, dans de nombreux cas, il est bien trop restrictif de ne considérer que la contrainte du matériau pour conclure au sujet de sa microstructure.

**Vitesse de déformation :** Lorsque la vitesse de déformation varie, la taille des sous-grains et la densité de dislocations varient également [37] [38]. En général, un accroissement de la vitesse de déformation provoque une augmentation de la contrainte, ce qui aura un effet sur la microstructure de l'acier obtenu (Figure 28). Là encore, la vitesse de déformation subie par le matériau lors du forgeage peut varier d'un point à un autre de la pièce, ce qui aura pour possible effet de favoriser l'hétérogénéité de la microstructure.



*Figure 28 : Courbes contrainte-déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) illustrant l'effet de la vitesse de déformation [38]*

## II.2.2.B. EFFET DE LA TEMPERATURE

**Température de chauffe :** Avant le procédé de forgeage, le matériau est chauffé à haute température. Puis, durant le forgeage, la température du matériau diminue progressivement. Selon la température de chauffe choisie, la microstructure initiale de l'alliage peut être différente [39] [40]. Par exemple, un acier bas carbone ( $\%C < 0,16$ ) est totalement austénitique au-dessus de  $700^{\circ}\text{C}$ . Par contre, en dessous de  $700^{\circ}\text{C}$ , ce même acier contiendra des grains d'austénite et des grains de ferrite. Imaginons que cet acier soit initialement chauffé à  $900^{\circ}\text{C}$ . Lors de son refroidissement pendant le forgeage, les grains de ferrite précipitent d'abord sur les joints de grains de l'austénite d'origine, comme l'illustre la Figure 29 (cas  $T_{i1}$ ). Imaginons un second cas : cette fois l'acier est chauffé à  $650^{\circ}\text{C}$ . Alors, pendant son refroidissement, les premiers germes de ferrite se forment à l'interface de l'austénite et de la ferrite proeutectoïde (déjà présente dans l'alliage avant forgeage). En outre les grains de ferrite proeutectoïde sont allongés suivant la direction de compression. Puis, lorsque la déformation se poursuit, l'austénite restante se transforme en ferrite et les grains de ferrite proeutectoïde recristallisent (Figure 29, cas  $T_{i2}$ ). Finalement, on constate qu'un même alliage a, après forgeage, une microstructure finale différente, trouvant son origine dans la microstructure initiale à chaud du matériau (Figure 29).

Une température suffisante de chauffe du matériau avant forgeage permet donc de transformer l'ensemble de l'acier en austénite. Si cette température est encore plus importante, on observe un grossissement des grains d'austénite. Or, la taille des grains finaux de ferrite est proportionnelle à la taille des grains originaux d'austénite [41]. Ainsi, une température de pré-forgeage très élevée provoque un grossissement des grains de la microstructure finale. Notons que l'ajout d'éléments de micro-alliage particuliers (notamment titane et niobium) peut provoquer la formation de carbures, nitrures et/ou carbonitrures. Ces précipités ayant la particularité de limiter la croissance des grains austénitiques, ils ont également un effet sur la microstructure finale de l'alliage [41] [42].

Dans la mesure où la matière première est forgée à une température importante (au alentour de  $1200^{\circ}\text{C}$ ), la microstructure de l'acier juste avant le forgeage est complètement austénitique avec des grains de taille plus importante que ceux présent dans la matière première avant chauffe.

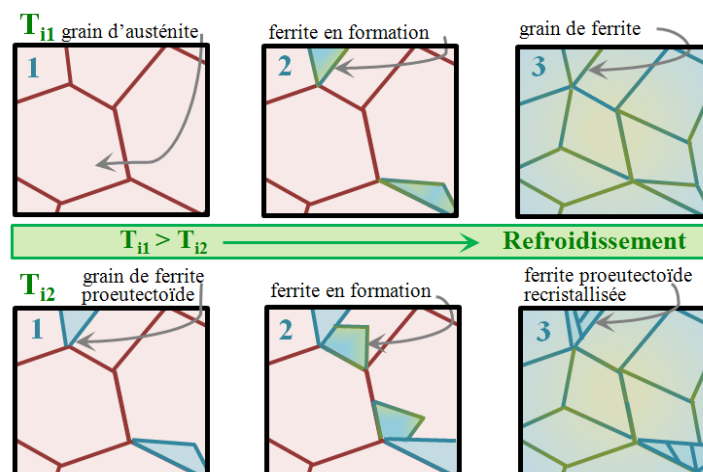
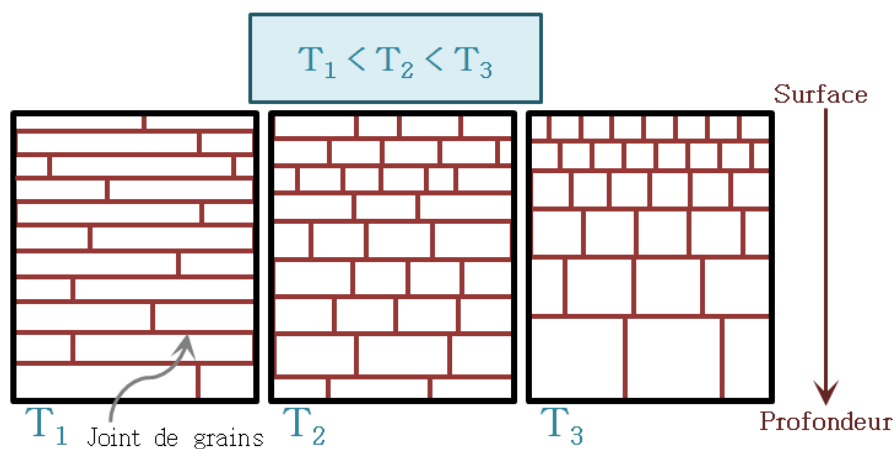


Figure 29 : Représentation schématique de l'effet de la microstructure initiale sur la microstructure finale

**Température de forgeage :** La température de forgeage est un paramètre déterminant car les mécanismes de restauration et de recristallisation sont thermiquement activés. Ainsi, une étude menée sur le forgeage d'engrenages décrit la dépendance qui existe entre la température de forgeage et la dimension et la forme des grains de ferrite obtenus (microstructure figée par trempe) [43]. A 750°C, les grains observés sont allongés aussi bien à la surface de la pièce qu'en profondeur en raison de déformations importantes sans possibilité de recristallisation. Lorsque la température de forgeage est augmentée, de plus en plus de grains équiaxes sont observés mais leurs dimensions sont de moins en moins homogènes lorsque l'on s'éloigne de la surface de la pièce (Figure 30). En outre, l'augmentation excessive de température provoque oxydation, décarburation et diminution de dureté (degré de résistance d'un matériau à la pénétration par un autre matériau). Donc le choix de la température aura un impact important sur les propriétés finales de la pièce, telle que la dureté.



*Figure 30 : Représentation schématique de l'effet de forgeage sur la microstructure*

La roue polaire est forgée à une température de l'ordre de 1200°C, température très importante par rapport aux températures de forgeage étudiées dans [43]. A priori, les grains de l'ensemble de la roue polaire seront équiaxes mais il est possible que l'on observe une hétérogénéité de leur taille : on parle de **peau de forge** à la surface de la pièce (cas  $T_3$  sur la Figure 30). En outre, l'importante température va favoriser l'oxydation et la décarburation. Une couche de **calamine** (couche d'oxydes adhérent à l'acier) se forme à la surface de la pièce après forgeage. L'étape de grenailage (**c.f. paragraphe I.3.3.a**) permettra alors de nettoyer la pièce. Notons que la vitesse de refroidissement des aciers ferritiques après le forgeage a un effet sur la taille de grains. Ainsi, une trempe provoque une diminution de la taille des grains par rapport à un refroidissement à l'air (de 27  $\mu\text{m}$  à 22  $\mu\text{m}$  par exemple dans [44])

**Recuit :** Les traitements thermiques post-forgeage sont généralement effectués dans le but d'affiner la microstructure de l'alliage. C'est une opération qui exige une bonne connaissance du matériau à optimiser. En effet, une température insuffisante ne permettra pas d'activer la restauration et/ou la recristallisation des grains mais une température trop importante provoquera un grossissement non contrôlé des grains ferritiques [41].

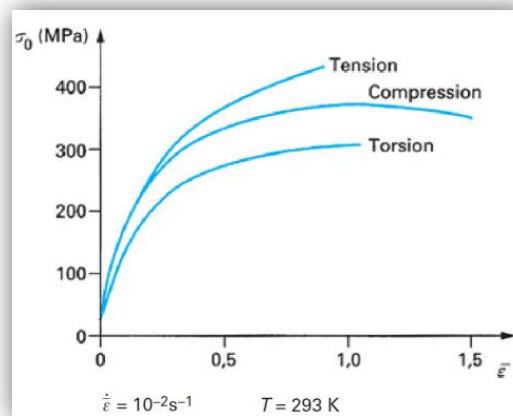


### II.2.3. Mise en forme à froid

La majorité des pièces métalliques est dans un premier temps mise en forme à chaud. Certaines sont utilisées telles quelles mais la plupart sont ensuite déformées à froid et les transformations de structure résultant de la déformation à chaud peuvent modifier les conditions de cette deuxième série d'opérations [36]. Le domaine de déformation à froid est défini de manière empirique par  $T/T_f < 0,3$ ,  $T$  désignant la température du matériau lors du procédé de mise en forme et  $T_f$  sa température de fusion commençante. Les **mécanismes athermiques** étant prédominants, les phénomènes de diffusion, de restauration et de recristallisation sont négligeables. Les effets du formage (procédé de mise en forme sans enlèvement de matière) et des procédés d'usinage (procédés de mise en forme à froid avec enlèvement de matière) sur la microstructure vont succinctement être exposés.

#### II.2.3.A. EFFET DU FORMAGE

Comme dans le cas de la déformation à chaud, la **contrainte**  $\sigma$  à froid est fonction de la **déformation**  $\epsilon$  et de la **vitesse de la déformation** mais, cette fois-ci, sa dépendance avec la température peut être négligée. A faible vitesse de déformation, l'influence de cette vitesse sur la contrainte  $\sigma$  peut également être négligée. La contrainte  $\sigma$  dépend principalement du **chemin de déformation**, comme l'illustre la Figure 31. En outre, la déformation plastique des métaux induit une texture cristallographique et par suite, une anisotropie du comportement.



*Figure 31* : courbes contrainte-déformation obtenues sur des échantillons de cuivre à température ambiante [45]

Dans les aciers ferritiques, les dislocations se rassemblent en écheveaux délimitant des cellules à peu près dépourvues de défaut (cellule d'écroutissage). Lorsque la déformation augmente, les écheveaux deviennent plus épais et plus enchevêtrés. Ainsi, les cellules rétrécissent et tendent vers une taille limite. Elles présentent entre elles de faibles désorientations cristallographiques qui augmentent avec la déformation. On notera enfin que les modifications microstructurales associées à la mise en forme à froid sont associées à des modifications importantes à plus large échelle : changement de la forme des grains et de leur orientation cristalline.

### II.2.3.B. EFFET DE L'USINAGE

Inévitablement, le processus d'**enlèvement de matière** va transformer la structure et les propriétés du matériau au voisinage de la surface de la pièce sur une profondeur donnée. Il est possible de classer les **procédés d'usinage** selon trois catégories [46] :

- les procédés de **coupe** : l'enlèvement de matière est assuré par l'action mécanique d'un outil coupant,
- les procédés par **abrasion** : l'enlèvement de matière est dû à l'action mécanique d'un grand nombre de grains abrasifs de petite taille et de haute dureté. Ces grains sont soit liés à un support solide (rectification, meulage), soit plaqués contre la pièce par une contre-pièce (rodage et polissage à la pâte abrasive), soit transportés par un milieu fluide (sablage, grenailage),
- les procédés **physico-chimiques** : l'enlèvement de matière est réalisé par des actions non mécaniques (électroérosion, oxycoupage, usinage chimique,...).

La **coupe** consiste à séparer de la pièce un copeau à l'aide de l'arête tranchante d'un outil. La matière donne naissance au copeau en un temps très bref, elle subit donc une déformation plastique et un échauffement considérables. Le lubrifiant joue un rôle non négligeable dans les opérations de coupe. En effet, à grandes vitesses d'usinage, il assure le refroidissement de l'arête de coupe et aux vitesses de coupe plus modérées, il diminue le frottement du copeau sur l'outil et facilite son extraction dans des procédés comme le perçage. La coupe transforme les propriétés mécaniques, chimiques et métallurgiques de la pièce sur une profondeur non négligeable et laisse subsister des bavures qu'il importe de réduire et d'éliminer.

L'étape de **grenailage** pourrait éventuellement introduire des contraintes résiduelles de compression à la surface du matériau. En effet, il s'agit d'un traitement de surface qui consiste à projeter sur la pièce à traiter des particules (généralement des billes d'acier) à grande vitesse (10 à 100 m/s) afin d'augmenter la résistance à la fatigue et à la corrosion ou simplement pour nettoyer la pièce. L'objectif du grenailage dans le cas des roues polaires est d'éliminer la couche de **calamine** (couche d'oxydes adhérent à l'acier qui se forme lorsque celui-ci subit un traitement à température élevée) de la surface de la pièce.

**Un certain nombre d'éléments ont été dégagés quant à l'effet des procédés de fabrication sur la microstructure d'aciers de composition proche de celle de la roue polaire. Nous nous intéressons donc maintenant aux liens existant entre microstructure et propriétés électromagnétiques de tels aciers.**

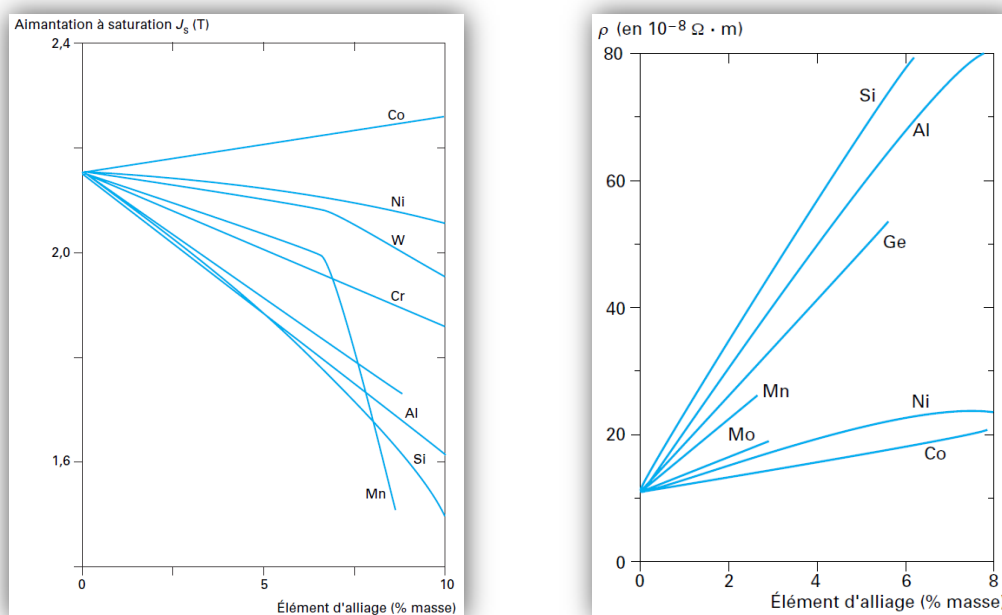
## II.3. Microstructure et propriétés électromagnétiques

### II.3.1. Propriété électromagnétiques d'un acier parfait

#### II.3.1.A. EFFET DE LA COMPOSITION CHIMIQUE

L'effet d'éléments en solution solide volontairement introduits ou non (éléments d'alliage ou impuretés) sur l'**aimantation à saturation** est restreint tant que leur proportion est minimale ( $< 0,1 \%$ ). Mais généralement, lorsque l'on ajoute des éléments d'alliage, leur proportion dépasse ce seuil. Les éléments non magnétiques provoquent, dans un premier temps, une baisse linéaire de l'aimantation, puis souvent une baisse plus rapide au moment où la concentration en éléments ajoutés conduit à une modification de la structure électronique de l'alliage (Figure 32). En outre, les impuretés précipitées peuvent avoir une action très néfaste sur les propriétés des aciers. La **température de Curie**, tout comme l'aimantation à saturation, sont essentiellement déterminées par la composition chimique de l'acier. Chaque composition devrait ainsi conduire à des caractéristiques magnétiques spécifiques. En réalité, ce n'est qu'une première approximation car les propriétés magnétiques d'usage des aciers (**perméabilité, champ coercitif,...**) sont également sensibles à la structure et aux défauts du matériau. La seule connaissance de la composition de l'acier ne permet donc pas d'estimer ces grandeurs.

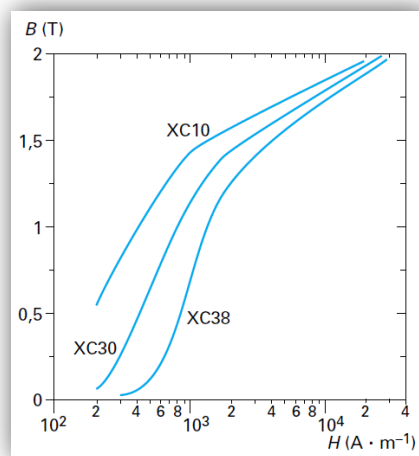
Le silicium est un élément souvent ajouté aux aciers destinés à une utilisation magnétique. En effet, l'ajout de cet élément permet d'augmenter la dureté et la rigidité de l'alliage [47] ainsi que sa **résistivité**, comme l'illustre la Figure 32. Rappelons que la résistivité du fer pur étant faible ( $10^{-7} \Omega \cdot m$ ), son utilisation sans silicium occasionnerait des pertes par courant de Foucault importantes (**c.f** paragraphe I.2.3).



*Figure 32 : Aimantation à saturation de quelques alliages de fer (gauche) et résistivité électrique, à 20°C de quelques alliages de fer (droite) [48]*

### II.3.1.B. EFFET DES PHASES EN PRESENCE

Les aciers sont bien souvent constitués de différentes phases (ferrite, perlite, martensite,...) et tirent leurs bonnes propriétés de cette complexité. Généralement, il existe une phase dominante riche en fer dans laquelle peut être dispersée une phase minoritaire. Dans le cas de la roue polaire la phase dominante est la **ferrite** et la phase minoritaire la **perlite**. La phase dispersée provoque un **ancrage des parois de Bloch** ce qui modifie les propriétés magnétiques de l'acier : la perméabilité magnétique diminue et le champ coercitif augmente (**c.f. paragraphe I.2.2.a.**). Une augmentation de la teneur en carbone dans un acier ferritique occasionne une augmentation de la fraction volumique de perlite, ce qui se traduit donc par un durcissement magnétique de l'acier (Figure 33).



*Figure 33* : Courbes  $B=f(H)$  de quelques aciers au carbone (0,1 / 0,3 et 0,38% de carbone) [48]

La nature et la teneur de la phase dispersée dans le matériau ne sont cependant pas suffisantes pour prévoir l'effet qu'elle aura sur les propriétés magnétiques. En effet, outre ces paramètres, la forme et la répartition de la phase minoritaire jouent un rôle important. Cela explique d'ailleurs le fait que les propriétés magnétiques des aciers soient influencées dans une large mesure par les traitements thermiques. Il est donc difficile de prévoir la perméabilité et le champ coercitif des aciers. La dureté peut tout de même donner un ordre de grandeur du champ coercitif mais il est plus délicat d'estimer la perméabilité à l'aide de la dureté [48].

**Remarque sur l'effet de la texture de l'acier** : Un matériau métallique est dit **texturé** lorsque l'orientation cristalline des grains n'est pas aléatoire. Il existe alors une orientation cristalline préférentielle. La texture cristallographique est importante car le comportement d'aimantation du réseau de fer est différent suivant les différentes directions cristallographiques [49][4] (**c.f. paragraphe I.2.1.a.**). Mais généralement, c'est principalement l'opération de **laminage** qui induit la texturation de l'acier (le traitement thermique peut également avoir un effet texturant) [50]. Or cette opération n'intervient pas dans la réalisation de la roue polaire qui est mise en forme par forgeage.

Finalement, bien que la matière première (barre) soit formée par laminage, la microstructure de la roue polaire n'est pas texturée de façon significative.

### II.3.2. Effets des défauts de microstructure de l'acier

Les propriétés électromagnétiques des aciers sont sensibles à la composition et à la structure cristalline des matériaux mais également à leurs imperfections [48]. Il s'agit ici d'apporter des éléments concernant l'effet des défauts ponctuels, des joints de grains (2D) et des précipités (3D) sur les propriétés électromagnétiques des aciers (**c.f. paragraphe II.1.2**). L'effet des dislocations sera traité dans le cadre de l'impact d'une sollicitation mécanique sur les propriétés électromagnétiques de l'acier, le mouvement des dislocations étant le principal mécanisme de réponse du matériau.

#### II.3.2.A. EFFET DES JOINTS DE GRAINS (2D)

Les joints de grains sont des défauts directement en lien avec la **taille de grains** car plus les grains sont de petites dimensions, plus la concentration en joints de grains dans le matériau est importante. Les joints de grains vont gêner le mouvement des parois de Bloch donc une **diminution de la taille de grains** provoque une **diminution de la perméabilité**, une **augmentation du champ coercitif** ainsi qu'une **augmentation des pertes magnétiques** [51] [52][4]. Par contre, l'aimantation à saturation (directement liée à l'induction maximale) n'est pas influencée par ce paramètre. L'optimisation d'un acier magnétiquement doux passe donc en première approche par un accroissement de la taille des grains.

Afin d'illustrer ce phénomène, on considère un acier électrique à grains non orientés ayant subi différentes températures de recuit [53] (Figure 34). On constate que lorsque la température de recuit de l'acier augmente, la taille des grains augmente (restauration, recristallisation et grossissement des grains) alors que les pertes par hystérésis  $P_{15/50}$  (mesurées à 1,5 T et 50 Hz) diminuent. Par contre l'induction magnétique  $B_{50}$  (mesurée à 5 kA.m<sup>-1</sup>) reste quasiment inchangée.

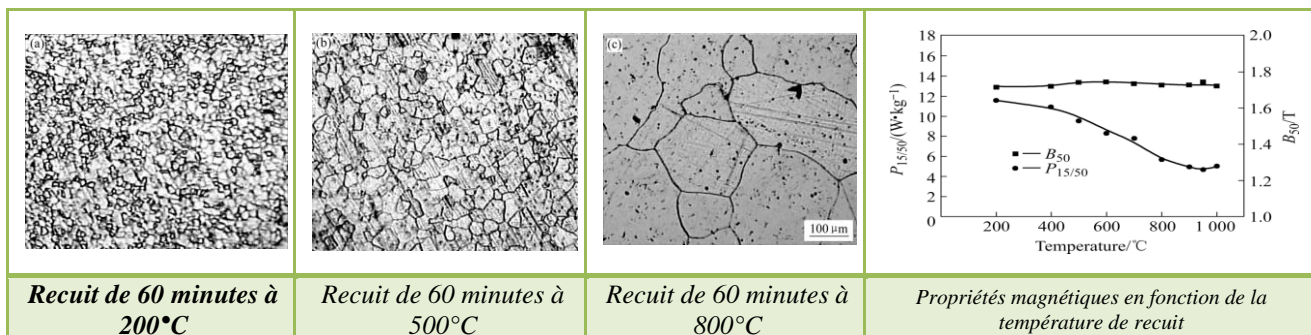


Figure 34 : Micrographies et propriétés magnétiques d'un acier électrique à grains non orientés [53]

Le champ coercitif  $H_c$  décroît avec l'augmentation de la taille des grains  $d$ , selon une relation linéaire inversement proportionnelle des deux grandeurs ( **$H_c=f(1/d)$** ) [49]. En outre, en supposant dans une première approximation qu'il existe une relation linéaire entre les pertes par hystérésis et le champs coercitif, alors les pertes  $P$  s'expriment également en fonction de la taille de grains  $d$ , selon

une relation inversement proportionnelle des deux grandeurs ( $P=f(1/d)$ ) [4]. La taille de grains est donc un paramètre important car son optimisation améliore les propriétés magnétiques des aciers.

Le **bruit de Barkhausen** est également impacté par la taille de grains, mais il est difficile de dégager une tendance dans la mesure où plusieurs effets contradictoires entrent en jeu [54]. En effet, une augmentation de taille de grains provoque une augmentation du volume des domaines de Weiss ce qui favorise un large mouvement des parois de Bloch et provoque des signaux de Barkhausen d'intensité importante et donc plus facilement détectable. Mais d'un autre côté, ce phénomène provoque une diminution du nombre de domaines de Weiss ce qui limite la fréquence du bruit de Barkhausen.

### II.3.2.B. EFFET DES DEFAUTS PONCTUELS ET DES PRECIPITES (3D)

La nocivité des impuretés chimiques et leur mode d'action dépendent à la fois de leur nature, de leur concentration, de la forme sous laquelle elles se trouvent et du type d'alliage. Pour résumer simplement, les éléments faiblement électropositifs ou faiblement électronégatifs, qui peuvent rester en solution solide dans l'alliage, modifient peu les caractéristiques magnétiques des produits. Par contre, dans le cas d'éléments fortement électronégatifs ou fortement électropositifs, l'effet sur les propriétés magnétiques est plus important. Les impuretés électronégatives peuvent se combiner et ainsi former des inclusions non magnétiques (oxydes, carbures,...). Leur effet dépend de leur nombre et de leur taille mais peu de leur nature chimique. Les précipités dont le diamètre est voisin de l'épaisseur de la paroi de Bloch du matériau sont les plus nocifs. En solution solide, la migration des impuretés de faible rayon atomique (carbone et azote en particulier), puis leur lente précipitation au cours du temps provoquent une dégradation progressive des caractéristiques en fonctionnement appelée **vieillessement magnétique** [48].

Le champ coercitif  $H_c$  peut finalement s'exprimer en fonction de la taille de grains  $d$  et de la densité d'inclusions non magnétiques  $N$  dont la taille est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la paroi de Bloch de l'alliage selon :

$$H_c = \frac{a}{d} + bN \quad (21)$$

avec  $a$  et  $b$  des coefficients propres à chaque alliage. Il est donc primordial de limiter les concentrations en impuretés.

### II.3.3. Effets de sollicitations extérieures

#### II.3.3.A. SOLLICITATION MECANIQUE

L'état du réseau cristallin d'un acier est un facteur déterminant pour ses propriétés magnétiques. Globalement, l'érouissage complexifie la structure en domaines. Les dislocations formées durant l'érouissage freinent le mouvement des parois de Bloch et diminuent ainsi la douceur magnétique de l'acier [16].

Des essais de traction menés sur un acier à grains non orientés FeSi ont en effet montré qu'une **déformation plastique** de celui-ci entraîne une **détérioration de ses propriétés magnétiques** quelle que soit la direction de mesure (dans le plan de la tôle) et ce, même pour des faibles niveaux de déformation [55], [56]. Cette détérioration peut de plus être intensifiée et rendue inhomogène par les défauts préexistants dans l'acier [57]. En outre, il a été constaté pour plusieurs matériaux que **l'aimantation rémanente** diminue et que l'intensité du **champ coercitif** augmente avec la déformation car le cycle d'hystérésis se déforme sous l'effet de la contrainte [58] [59] (Figure 35).

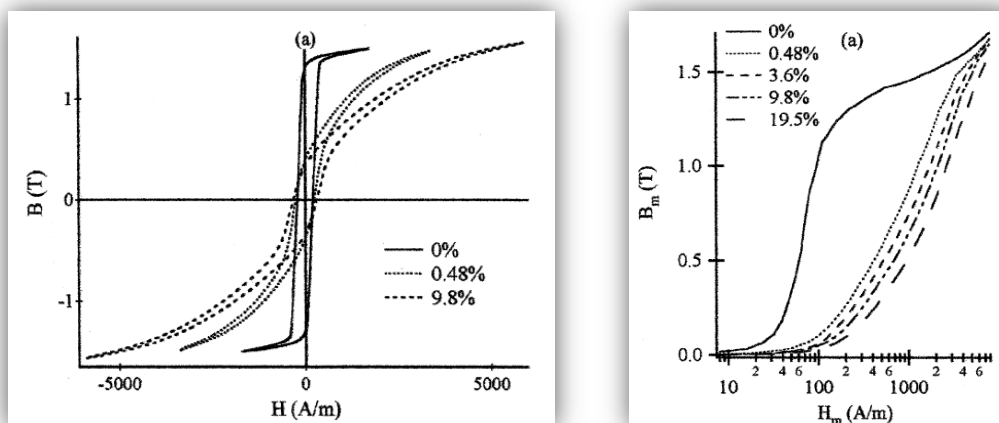


Figure 35 : Courbes  $B=f(H)$  pour différentes déformations en traction de l'alliage à grains non orientés FeSi (3%) [59]

Le mouvement des dislocations à lui seul ne peut pas expliquer une telle diminution des propriétés magnétiques de l'acier aux faibles déformations. Il faut également prendre en compte l'anisotropie introduite par la déformation plastique [59]. En effet, les contraintes résiduelles peuvent par exemple être associées à une alternance de zones de tension et de compression. En outre, il a été observé que la dégradation des propriétés magnétiques selon la direction transversale à celle de la contrainte est moins prononcée que la dégradation suivant la direction colinéaire à celle-ci (alliage à grains non orientés FeSi) mais cette différence de comportement diminue avec l'augmentation du champ magnétique (quel que soit le degré de déformation plastique). Le même effet d'anisotropie est mis en évidence pour l'évolution des niveaux de pertes.

### II.3.3.B. SOLLICITATION THERMIQUE

Rappelons qu'une augmentation de la température traduit une agitation atomique croissante. L'agitation atomique entravant le mouvement des électrons, la **conductivité électrique diminue** lorsque la **température augmente** (c.f. paragraphe I.1.1.a). De même, l'**aimantation à saturation diminue** lorsque la **température augmente**, en particulier à l'approche de la température de Curie  $T_C$  (Figure 36) (c.f. paragraphe I.1.3.c). En effet, à partir de cette température, le matériau se comporte comme un matériau paramagnétique.

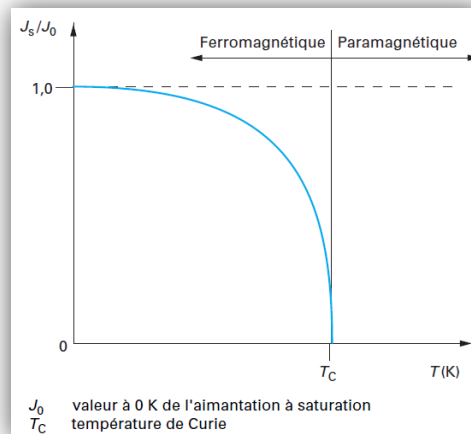


Figure 36 : Variation de l'aimantation avec la température [48]

Les variations de la conductivité électrique, de l'aimantation à saturation et de l'ensemble des propriétés électromagnétiques avec la température sont **réversibles** s'il s'agit de phénomènes liés à la seule agitation atomique. Par contre, une augmentation de la température peut activer des mécanismes changeant définitivement la microstructure de l'acier. Les propriétés électromagnétiques du matériau sont alors modifiées de façon **irréversible**. Ainsi, une température élevée voire modérée (de l'ordre de  $150^\circ\text{C}$  [48]), favorisant la diffusion atomique, provoque une lente évolution de la composition locale du matériau. Certains atomes peuvent alors, en se rencontrant, former des précipités dommageables pour les propriétés électromagnétiques de l'acier.

Mais la température peut également être utilisée judicieusement pour obtenir une microstructure plus favorable. C'est tout le propos des **recuits**. Le recuit est un procédé correspondant à un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement permettant de modifier les caractéristiques d'un métal. Dans le cadre des aciers magnétiques doux, son objectif est généralement de grossir la taille des grains du matériau afin de diminuer les pertes et améliorer la perméabilité magnétique [53] et de relâcher les contraintes mécaniques. Notons que la température de recuit est un paramètre plus déterminant que la durée de recuit. En outre, il semble qu'une grande vitesse de montée en température soit préférable car les grains ainsi obtenus sont plus gros. En effet, une grande vitesse de montée en température apporte beaucoup d'énergie en un court laps de temps ce qui favorise la recristallisation du matériau et donc l'augmentation de la taille des grains. La mise au point d'un recuit adapté à un matériau donné est donc une démarche très complexe.



### II.3.4. Paramètres microstructuraux déterminants

L'**aimantation à saturation** est indépendante des paramètres microstructuraux. En effet, elle dépend avant tout de la composition de l'acier et de la température. Par contre, les paramètres microstructuraux, en particulier la taille des grains, les inclusions et les contraintes internes (contraintes résiduelles introduites généralement par le procédé de mise en forme), ont une forte influence sur les autres propriétés magnétiques [4]. En outre, il a été observé que des défauts de surface tels que des microfissures de l'acier pouvaient également influencer de façon néfaste les propriétés magnétiques des pièces [4], [57]. Ainsi la **perméabilité magnétique diminue** et le **champ coercitif augmente** (durcissement magnétique) si :

- la teneur en phase perlitique augmente (et donc si la teneur en carbone augmente),
- la taille des grains diminue,
- la concentration en précipités (de dimension similaire aux parois de Bloch) augmente,
- la concentration en dislocations augmente (augmentation de l'écrouissage).
- 

La **résistivité électrique** est, comme l'aimantation à saturation, fonction de la composition de l'acier et de la température (la résistivité augmente avec la température). Elle dépend également, dans une moindre mesure, du taux d'écrouissage et de la taille des grains. En fait, tout ce qui s'oppose au passage des électrons (dislocations, joints de grains) provoquera l'augmentation de la résistivité électrique du matériau.

**Ainsi, il existe un lien complexe à quantifier mais observable entre la microstructure des aciers ferritiques et leurs propriétés électromagnétiques. Dans la mesure où les procédés de fabrication d'une pièce forgée impactent la microstructure du matériau, ils impacteront également les propriétés électromagnétiques de la pièce forgée.**

## II.4. Synthèse : effet du procédé de fabrication sur les roues polaires

Les roues polaires sont forgées à base d'acier doux et refroidies lentement, avant de subir différentes étapes de mise en forme à froid. L'effet du procédé de forgeage sur les propriétés magnétiques des roues polaires a pu être constaté expérimentalement (c.f. **paragraphe, I.3.3.a, Figure 19**). L'objectif du travail bibliographique est donc d'apporter des éléments de précisions sur les tendances de comportement du matériau. L'effet du procédé de forgeage sur les aciers ferritiques est de toute évidence complexe car de nombreux mécanismes, parfois antagonistes, sont à prendre en compte. Mais il est tout de même possible de dégager un certain nombre de tendances

### II.4.1. Effets du forgeage sur la microstructure de la roue polaire

Les roues polaires sont préchauffées à au moins 1200°C, donc la microstructure initiale est l'**austénite**. Cette température favorisera une croissance des grains de la microstructure initiale. A priori, peu d'impuretés s'opposeront à cette croissance.

La matière est déformée lors du forgeage dans des conditions probablement différentes d'un fournisseur à l'autre. Mais dans tous les cas, la déformation locale du matériau va être variable d'un point à un autre de la roue polaire en formation. Il va ainsi exister une distribution du taux de dislocations non isotrope dans la roue polaire. En outre, il est possible que dans certaines zones (comme les griffes) le taux de déformation soit suffisant pour activer la recristallisation mais pas dans d'autres zones (le plateau). Remarquons bien qu'il s'agit d'une possibilité, une autre étant que le taux de déformation soit suffisant pour activer, dans toute la pièce, la recristallisation. La température élevée va favoriser un accroissement des grains pendant le forgeage et une oxydation du matériau (couche de calamine).

Finalement, le refroidissement lent de la pièce va, une fois encore, favoriser un grossissement des grains. En outre, la teneur en carbone de la pièce va provoquer la formation d'un faible pourcentage de perlite.

### II.4.2. Effets du forgeage sur les propriétés de la roue polaire

La mise en forme d'acier magnétiquement doux par forgeage est généralement accompagnée d'une dégradation de ses propriétés magnétiques [27]. Mais l'**aimantation à saturation** de l'acier de la roue polaire n'est déterminée que par la composition de celui-ci ainsi que par la température d'utilisation de la pièce.

Dans le procédé de mise en forme de la roue polaire, tout est fait pour favoriser la **croissance des grains de ferrite**. Ceci aura pour effet intéressant d'**augmenter la perméabilité** de l'acier mais **diminuera la résistivité électrique**. La haute température de forgeage (1200°C) favorise l'homogénéité de la microstructure bien que la déformation de la matière induira toujours une hétérogénéité plus ou moins prononcée. Il est difficile de prédire le taux d'écrouissage de la pièce

finale. Mais là encore, il est probable que la température importante de forgeage permette une restauration du matériau ce qui aura pour effet, dans une certaine mesure, d'adoucir et d'homogénéiser les propriétés électromagnétiques de la roue polaire. Par contre, si la perlite forme des grains de tailles similaires à celles des parois de Bloch, elle aura pour effet de durcir magnétiquement le matériau.

#### II.4.3. Effets des autres étapes du procédé de fabrication de la roue polaire

Le procédé de fabrication de la roue polaire se poursuit avec l'usinage de celle-ci. Les dislocations qui vont apparaître lors de cette étape de fabrication vont **durcir magnétiquement** le matériau. Il existera donc une hétérogénéité entre les propriétés de surface de l'acier de la roue polaire (modifiées lors de l'usinage) et les propriétés de cœur (inchangées une fois le forgeage terminé).

La roue polaire subit également des étapes de mise en forme sans enlèvement de matière (formage). Là encore, ces transformations ayant pour effet d'écrouir le matériau (augmentation du taux de dislocations), ces transformations durcissent magnétiquement le matériau.

**L'acier brut va ainsi subir des sollicitations mécaniques et thermiques. Au regard d'un procédé de fabrication type, il est clair que le matériau va se transformer pendant la fabrication de la roue polaire, rendant alors possible une certaine hétérogénéité des propriétés de la pièce qui, en tout état de cause, seront différentes de celles de la matière première. Il est donc pertinent de sonder localement la roue polaire pour connaître précisément ses propriétés électromagnétiques. Le chapitre suivant propose donc une présentation des différents outils qui permettront de mener à bien la caractérisation électromagnétique des roues polaires. Il est nécessaire d'introduire des notions de métrologie, qui permettront de juger de la qualité des mesures obtenues, ainsi que des outils de modélisation. Puis, des méthodes de caractérisation des propriétés électriques et magnétiques, intéressantes pour notre application, seront ensuite présentées.**

## Chapitre 2

# OUTILS ET METHODES POUR LA CARACTERISATION ELECTROMAGNETIQUE DES ACIERS DOUX

**I- Outils génériques pour la caractérisation**

**II- Méthode de caractérisation de la conductivité électrique**

**III- Méthode de caractérisation des propriétés magnétiques**

