

Le refroidissement final est généralement réalisé à l'air, en effet la stabilité de la structure fait qu'aucune transformation n'intervient alors. Pour un acier non allié du type C42 le traitement peut être (par exemple) organisé comme suit :

- chauffage à 710°C,
- maintien de 12 heures en température,
- refroidissement lent (20°/h) jusqu'à 500°C,
- refroidissement final à l'air.

La durée du maintien en température influence le résultat du traitement en modifiant l'importance de la coalescence comme l'illustre le **tableau 1** pour des traitements à 700°C (la dureté est prise ici comme repère de l'adoucissement). Dans des cas difficiles, il est possible de faire osciller plusieurs fois la température autour de Ac1, dans un intervalle qui ne dépasse pas $\pm 50^\circ\text{C}$. Il est alors nécessaire de réaliser un refroidissement final en deux étapes, la première ramenant lentement le métal à une température légèrement inférieure à Ac1 de telle sorte que l'austénite formée se transforme.

Il est notable que le traitement de globulisation est d'autant plus efficace qu'il est appliqué à une structure instable (bainitique voire martensitique). Une globulisation accompagnée d'une coalescence importante peut rendre plus difficile la mise en solution des carbures lors d'une austénitisation ultérieure surtout si cette dernière est rapide (trempe HF). L'homogénéisation de l'austénite demande en effet un temps plus long de diffusion du carbone (et éventuellement des éléments carburigènes) ou une accélération de la diffusion par une élévation de la température. Le **tableau 2** donne deux exemples de l'ampleur nécessaire d'une telle élévation dans le cadre d'un chauffage par induction à 130°C/s.

LES RECUITS

Dans le cadre du langage normalisé, on appelle recuit un traitement comportant un chauffage jusqu'à une température dite température de recuit déterminée en vue du but à atteindre, éventuellement un maintien isotherme ou des oscillations autour de cette température, ou bien un refroidissement à l'air calme ou suivant une loi imposée. L'imprécision de ce texte est due au fait que l'on distingue différents type de recuits parmi lesquels nous retiendrons :

- Le recuit complet qui passe par une austénitisation suivie d'un refroidissement lent dans le domaine de transformation de l'austénite en ferrite et perlite.
- Le recuit isotherme qui comporte une austénitisation suivie par un refroidissement approprié jusqu'à une température (le plus souvent comprise entre 525°C et 675°C) où se produit la transformation en ferrite et perlite (en évitant toute formation de bainite ou de martensite). L'acier est maintenu à cette température jusqu'à la fin de la transformation. Le refroidissement final n'étant pas susceptible de provoquer une transformation se fait généralement à l'air.
- Le recuit d'amélioration de l'usinabilité (dit aussi recuit pour usinage) qui est une variante du recuit isotherme.

Nous ne retiendrons pas les traitements dits aussi "recuits" (par abus de langage) et qui ne comportent pas d'opération d'austénitisation ("recuit de coalescence" déjà examiné

	Dureté HV après un maintien à 700°C d'une durée de :			
Nuances	30 min	2 heures	16 heures	128 heures
C38	180	172	162	160
38Cr4	190	192	182	162
35NiCr6	220	215	200	185

Tableau 1. Influence de la durée du maintien en température sur la dureté HV après globulisation.

Nuance	État initial	Température
C55	Globulisé	875°C
	Ferrite-perlite grossière	855°C
	Ferrite-perlite fine	815°C
50CrMo4	Globulisé	1 190°C
	Ferrite-perlite grossière	1 085°C
	Ferrite-perlite fine	990°C

Tableau 2. Modifications de la température optimale d'austénitisation en fonction de l'état initial lors d'un chauffage à 130°C/s.

ci-dessus sous l'appellation "traitement de globulisation", "le recuit de détente", "le recuit de relaxation", le "recuit de restauration" décrits plus loin).

Le recuit complet

Rappelons que ce mode de traitement a pour objet de provoquer, après austénitisation, une transformation peu différente de celle se déroulant en conditions d'équilibre et donc de conférer à l'acier une structure ferrito-perlitique. Ainsi, ses caractéristiques mécaniques de résistance seront affaiblies ce qui facilitera sa mise en œuvre.

Pour provoquer une telle transformation en ferrite et perlite la loi de refroidissement, après austénitisation, doit être plus lente que celle qui borde, dans le diagramme TRC, l'arrière du domaine bainitique (courbe LB de la **figure 1**). L'expérience montre que cette transformation est très généralement achevée à une température qui n'est pas inférieure à 500°C. Pour caractériser les lois de refroidissement correspondantes il est alors pratique de prendre en compte, soit le temps mis pour passer de la température d'austénitisation à ce niveau de 500°C, temps représenté ici par $DtA/500$, soit la vitesse moyenne de refroidissement entre la température d'austénitisation et 500°C, vitesse représentée ici par $VA/500$.

Le refroidissement qui achève le recuit doit alors obéir aux conditions suivantes :

- Le temps mis pour revenir de la température d'austénitisation jusqu'à 500°C doit être supérieur à la valeur limite de $DtA/500$ correspondant à la loi de refroidissement LB (voir courbe 1) qui borde, dans le diagramme TRC, l'arrière du domaine bainitique.
- La vitesse moyenne de refroidissement entre la température d'austénitisation et 500°C doit être inférieure à la valeur limite de $VA/500$ correspondant à la loi de refroidissement LB (voir courbe 1) qui borde, dans le diagramme TRC, l'arrière du domaine bainitique.

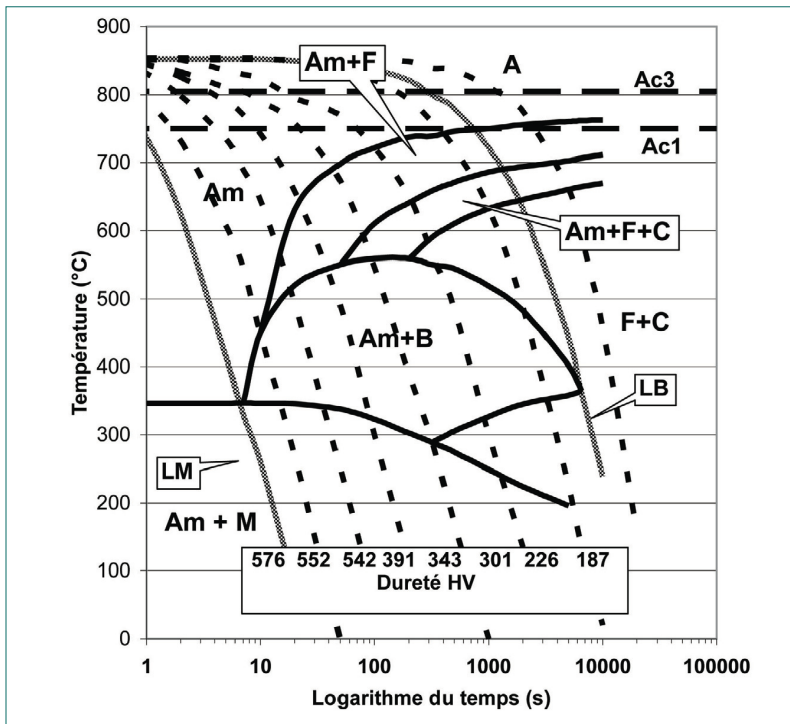


Figure 1. Diagramme TRC d'un acier 35CrMo4. A = austénite. Am = austénite métastable. F = ferrite. C = carbure. B = bainite. M = martensite

DtM (s)	DtA/500 limite	VA/500 limite (*)
1	4 s	94°C/s
2	7 s	54°C/s
3	9 s	42°C/s
4	12 s	31°C/s
5	14 s	27°C/s
6	16 s	23°C/s
7	18 s	21°C/s
8	20 s	19°C/s
9	21 s	18°C/s
10	23 s	16°C/s

Tableau 3. Approche de la correspondance entre les valeurs des paramètres DtM, DtA/300 limite et VA500 limite pour des aciers non alliés. (*) vitesse moyenne de refroidissement limite entre la température d'austénitisation et 500°C.

Acier	DtM	DtA/500 limite	VA/500 limite (*)
base non allié	5 s	14 s	27°C/s
base + 1%Ni	8 s	60 s	360°C/min
base + 1%Cr	22 s	82 s	280°C/min
base + 1%Mn	12 s	370 s	60°C/min
base + 0,5%Mo	6 s	2800 s	8°C/min
base + 1%Cr+0,25%Mo	24 s	1200 s	19°C/min
base + 1%Mn+1%Ni	20 s	1700 s	13°C/min
base + 1%Mn+1%Cr	54 s	2300 s	10°C/min

Tableau 4. Quelques indications sur la relation entre les valeurs des paramètres DtM, DtA/500 limite et VA/500 limite pour des aciers faiblement alliés à 0,30%C.

À titre indicatif on peut considérer que les valeurs limites de ces paramètres (DtA/500 et VA/500) qui correspondent dépendraient :

- De la trempabilité et serait donc lié au paramètre DtM correspondant à la loi de refroidissement critique de transformation martensitique (la loi la plus lente qui donne encore et seulement de la martensite - courbe LM de la figure 1).
- De la composition chimique de l'acier, certains éléments d'alliage interviendraient ici en modifiant les conditions de formation de la bainite.

Le **tableau 3** donne quelques ordres de grandeur illustrant cette relation pour des aciers non alliés.

Avec des aciers faiblement alliés cette relation est modifiée ; les éléments d'alliage ont tendance à élargir le domaine bainitique vers les refroidissements plus lents et donc à augmenter DtA/500 limite et diminuer VA/500 limite.

Le **tableau 4** rassemble quelques informations (qui ne peuvent être ici que des ordres de grandeur).

Avec des aciers plus trempants c'est-à-dire plus alliés les paramètres DtA/500 limite et VMA/500 limite prennent des valeurs dont le respect n'est pas compatible avec les possibilités industrielles comme on peut le constater au vu des indications suivantes :

- **Pour un acier allié type 35NiCrMo16**, le refroidissement limite correspondrait à DtA/500 = 5 700 000 secondes, soit une vitesse moyenne limite entre la température d'austénitisation et 500°C de 0,2°C/heure.
- **Pour un acier allié du type 30CrNiMo8**, le refroidissement limite correspondrait à DtA/500 = 5 700 000 secondes, soit une vitesse moyenne limite entre la température d'austénitisation et 500°C de 0,2°C/heure.
- **Pour un acier allié du type 35CrNiMo6**, le refroidissement limite correspondrait à DtA/500 = 20 700 secondes, soit une vitesse moyenne limite entre la température d'austénitisation et 500°C de 60°C/heure.

Ainsi donc le recuit complet ne pourra pas être effectué sur des aciers trempants, car il exigerait des durées de refroidissement trop grandes (théoriquement plus de 2 mois pour l'acier 35NiCrMo16 et plus d'une semaine pour l'acier 30CrNiMo8!) et donc trop coûteuses. L'adoucissement ne pourra alors être réalisé qu'à travers un traitement de globulisation.

Par contre, pour les aciers non alliés (DtM petit < 10s), le refroidissement qui achève le recuit peut être relativement rapide (DtA/500 limite de l'ordre de la demi minute) (voir **tableau 3**). Pratiquement, il est intéressant de noter, par exemple, qu'un refroidissement à l'air calme de ronds de différents diamètres en acier non alliés peut alors convenir comme le montre le **tableau 5**.

Pour les aciers moyennement trempants (10s < DtM < 100s), le refroidissement qui achève le recuit doit être réalisé dans un four à refroidissement piloté (pour des aciers un peu moins trempants ce peut être un refroidissement dans un four clos éteint). Si le refroidissement est réalisé dans les bonnes conditions, il peut être accéléré à partir de 500°C par exposition des produits à l'air car à cette température la transformation est achevée.

L'examen des diagrammes TRC montre qu'en deçà du refroidissement limite permettant de former une structure sans bainite ni martensite les refroidissements plus lents conduisent à des structures plus grossières notamment en ce qui concerne la perlite et à des taux de ferrite légèrement plus faibles. Dans ce domaine le ralentissement du refroidissement provoque donc un adoucissement plus important.

Le recuit isotherme

Selon le langage normalisé, ce recuit isotherme est dit comporter successivement une austénitisation, un refroidissement approprié jusqu'à une température où se produira la transformation en ferrite et en agrégats de cémentite sans formation ni de bainite ni de martensite, un maintien de durée convenable pour que la transformation de l'austénite soit totale, et un refroidissement quelconque jusqu'à la température ambiante.

Les diagrammes TTT de transformation en conditions isothermes renseignent sur les conditions dans lesquelles l'austénite va alors se transformer. Ils montrent que :

- La formation unique de ferrite et de perlite exige que la température de transformation isotherme soit comprise dans l'intervalle entre A_{c1} et, environ, 525-550°C.
- Après l'arrivée à la température de transformation cette dernière ne débute qu'après un certain temps d'incubation, temps d'autant plus court que la température est basse (dans l'intervalle indiqué ci-dessus) et d'autant plus long que la trempabilité de l'acier est grande.
- La durée du maintien nécessaire pour parvenir à la fin de transformation est d'autant plus courte que la température est basse (dans l'intervalle indiqué ci-dessus) et d'autant plus long que la trempabilité de l'acier est grande.
- La structure formée est d'autant plus fine que la température est basse (dans l'intervalle indiqué ci-dessus) ; sa dureté augmente avec le gain de finesse.

Il faut tenir compte du fait que pour tracer ces diagrammes TTT on fait en sorte que le passage de la température d'austénitisation jusqu'à la température de transformation soit quasiment instantané (petits échantillons immergés dans un "gros" bain de sels fondus). En pratique industrielle le refroidissement (qui ne serait pas instantané) serait défini par le temps disponible (apprécié sur le diagramme TRC) pour atteindre la température de transformation en évitant toute transformation. Ce délai, très court pour les aciers non alliés (au maximum de quelques secondes) augmente avec la trempabilité (par exemple quelques secondes à quelques dizaines de secondes pour des aciers 35Cr4 ou 35CrMo4) ce qui faciliterait l'opération mais alors, pour des aciers alliés, la durée du maintien devient trop longue et donc trop onéreuse.

Dans la mesure où elle serait possible, une telle opération exigerait la mise en œuvre d'un four à passage

Diamètre	Valeur limite °C/s	Refroidissement en air calme	
		VA/500 en peau °C/s	VA/500 à cœur °C/s
10	La vitesse moyenne de refroidissement depuis la température d'austénitisation jusqu'à 500°C doit être inférieure à 10°C/s (voir tableau 3).	7,1	6,2
20		3,5	3
30		2,4	1,9
40		1,8	1,4
50		1,4	1,1
60		1,2	0,9
70		1,0	0,8
80		0,9	0,7
90		0,8	0,6
100		0,7	0,5

Tableau 5. Comparaison des valeurs du paramètre $DtA/500$ lors du refroidissement à l'air calme de ronds de différents diamètres avec les valeurs limites pour le recuit complet d'aciers non alliés.

équipé à sa sortie d'un bain de sels fondus et ne pourrait être réalisée que sur des petites pièces. Dans bien des cas cette procédure serait trop contraignante et surtout trop onéreuse (équipements et gestion des rejets) pour un simple adoucissement.

LE RECUIT POUR USINAGE

Ce recuit est un cas de réalisation d'un recuit industriel de type isotherme auquel on demande de provoquer la formation d'une structure ferrito-perlitique fine. La dureté ainsi obtenue permet l'usinage et la finesse des constituants assure un bon état de surface. La température de transformation est ajustée de telle sorte qu'elle soit la plus basse possible (dans l'intervalle indiqué ci-dessus pour les traitements isothermes) mais assez haute cependant, afin que la durée du maintien nécessaire ne soit pas excessive. A titre indicatif, on peut la situer dans l'intervalle 575-650°C. Industriellement un tel traitement est réalisé, pour des aciers faiblement alliés, à l'aide de deux fours à passage :

- Le premier assure l'austénitisation.
- Le second réalise, dans sa première partie, le maintien à la température de transformation et dans sa deuxième partie un refroidissement lent destiné à permettre la fin de la transformation de l'austénite si la durée du maintien était insuffisante.
- Entre les deux fours, un espace est ménagé qui permet le refroidissement des produits à l'air (soufflé éventuellement) depuis la température d'austénitisation jusqu'à la température de maintien. On admet que le fait d'effectuer ce refroidissement qui n'est pas parfait n'empêche pas de parvenir à l'usinabilité escomptée. ■