

Les particularités métallurgiques des aciers à outils (2/2)

Guy Murry, Ingénieur-conseil

Cet article est paru dans
le n°396 de juin 2009.



Après avoir étudié les particularités métallurgiques des aciers à outil pour travail à froid (numéro 395, mai 2009), nous nous intéressons dans cette seconde partie à celles des aciers à outil pour travail à chaud.

Dans le groupe des aciers à outils alliés pour travail à chaud, la norme NF EN ISO 4957 place neuf nuances assez diverses dont la teneur en carbone est comprise entre 0,25 et 0,6% et dont la spécificité réside dans le fait qu'elles sont alliées avec des éléments carburigènes comme le montre le tableau 1. Cette particularité permet de leur conférer par revenu à une température supérieure à 450 °C une dureté élevée suffisamment stable à chaud pour satisfaire les exigences du type de travail considéré ici.

Ces nuances sont caractérisées par leur capacité de durcissement que l'on peut quantifier en prenant en compte leur teneur en carbone et leur dureté à l'état trempé et revenu (tel que figurant dans la norme) et leur trempabilité vérifiée, selon la norme, à l'aide d'une mesure de dureté sur un échantillon type traité selon les conditions imposées. Le tableau 2 rassemble ces données.

En complément, le tableau 3 regroupe des indications complémentaires utiles au métallurgiste.

Ces données permettent de noter que :

- les aciers présentés ont, compte tenu de leurs teneurs en éléments d'alliage, des trempabilités suffisantes pour que cette caractéristique ne pose généralement pas de problème,
- après arrêt de la trempe à la température ambiante, la teneur en austénite résiduelle ne dépasse pas 10 %,
- la transformation martensitique est pratiquement terminée après trempe suivie d'un refroidissement à -130 °C.

En ce qui concerne le revenu, la norme dé-

crit les variations de la dureté en fonction de la température à laquelle il est réalisé. Un exemple en est donné à la figure 1 qui fait bien apparaître les différents domaines de transformation structurale (avec rappel de ce que seraient ces évolutions avec un acier non allié à teneur comparable en carbone) :

- à basse température (<250 °C) précipitation du carbure e ($Fe_{2-3}C$) accompagnée d'une faible baisse de la dureté (identique en absence d'éléments d'alliage), l'effet adoucissant de la précipitation est partiellement compensé par l'effet durcissant dû à la finesse des précipités,
- au-dessus de 250 °C et jusqu'à environ 500 °C le carbone précipite sous forme de cémentite substituée (Fe_3M)₂C assez fine qui met en jeu les éléments carburigènes (surtout Cr et W) mais aussi Mn et provoque un durcissement d'autant

plus important que les teneurs en ces éléments sont élevées (d'où l'écart avec l'acier non allié),

- au-dessus de 500 °C le début de coalescence de la cémentite substituée engendre un adoucissement qui est partiellement compensé par le durcissement secondaire dû à l'échange du carbone qui permet la précipitation des carbures des éléments carburigènes. Cette évolution maintient la dureté à un niveau relativement élevé favorable à la tenue mécanique à chaud.

Le tableau 4 donne des ordres de grandeur des duretés ainsi accessibles.

Pour assurer une bonne tenue mécanique lors du travail à chaud, il est nécessaire de stabiliser l'état structural en exécutant un revenu à une température sensiblement supérieure à la température de travail afin que le fait de porter l'acier à cette dernière température n'engendre pas un processus de revenu supplémentaire qui abaisserait la résistance mécanique de l'acier. La figure 2 décrit, à

Nuances	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
55NiCrMoV7 (2)	0,55	0,25	0,75	1	0,45	0,1	
32CrMoV12-28	0,315	0,25	0,3	2,95	2,75	0,55	
X37CrMoV5-1	0,37	1	0,375	5,15	1,3	0,4	
X38CrMoV5-3	0,375	0,4	0,4	5	2,95	0,5	
X40CrMoV5-1	0,385	1	0,375	5	1,35	1	
50CrMoV13-15	0,5	0,5	0,7	3,25	1,5	0,25	
X30WCrV9-3	0,3	0,25	0,3	2,85		0,4	9
X35CrWMoV5	0,36	1	0,35	5,125	1,425	0,35	1,35
38CrCoWV18-17-17 (3)	0,4	0,325	0,35	4,35	0,4	1,9	4,15

Tableau 1 : Composition chimique moyenne (%) des aciers alliés pour travail à chaud selon NF EN ISO 4957 (1).

(1) Pour toutes les nuances S £ 0,030 % et P £ 0,030 %. (2) 1,50 £ Ni % £ 1,80. (3) 4,00 £ Co % £ 4,5.

Nuances	Teneur moyenne en C	Austénitisation (°C)		HRC après (*) trempe et revenu	
		Selon norme	Usuelle	Température de revenu	HRC
55NiCrMoV7	0,55	850	850 à 880	500 °C	≥ 42
32CrMoV12-28	0,315	1040	1020 à 1070	550 °C	≥ 46
X37CrMoV5-1	0,37	1020	1000 à 1050	550 °C	≥ 48
X38CrMoV5-3	0,375	1040	1000 à 1050	550 °C	≥ 50
X40CrMoV5-1	0,385	1020	1000 à 1050	550 °C	≥ 50
50CrMoV13-15	0,5	1010	940 à 1020	510 °C	≥ 56
X30WCrV9-3	0,3	1150	1150 à 1200	600 °C	≥ 48
X35CrWMoV5	0,36	1020	1000 à 1050	550 °C	≥ 48
38CrCoWV18-17-17	0,4	1120	980 à 1200	600 °C	≥ 48

Tableau 2 : Niveaux de dureté des aciers alliés pour travail à chaud après trempe et revenu sur échantillon type selon norme. (*) Selon conditions imposées par la norme NF EN ISO 4957.

Nuances	Ms	Mf	dtM ⁽¹⁾	dJ ⁽²⁾	γ résiduelle ⁽³⁾	
	Valeurs moyennes				20 °C	- 130 °C
55NiCrMoV7	240 °C	< -130 °C	130 s	20 mm	10 %	2 %
32CrMoV12-28	340 °C	30 °C	1250 s	(4)	0 %	0 %
X37CrMoV5-1	300 °C	- 50 °C	> 30000 s	(4)	4 %	0 %
X38CrMoV5-3	290 °C	- 80 °C	> 40000 s	(4)	5 %	0 %
X40CrMoV5-1	290 °C	- 60 °C	> 35000 s	(4)	4 %	0 %
50CrMoV13-15	260 °C	- 140 °C	> 2700 s	(4)	8 %	< 1 %
X30WCrV9-3	370 °C	90 °C	330 s	45 mm	0 %	0 %
X35CrWMoV5	300 °C	- 40 °C	> 30000 s	(4)	3 %	0 %
38CrCoWV18-17-17	300 °C	- 40 °C	> 10000 s	(4)	3 %	0 %

Tableau 3 : Ordres de grandeur de certains paramètres spécifiques. (1) Paramètre %t700/300 correspondant à loi critique de transformation martensitique. (2) Distance à l'extrémité refroidie de l'éprouvette Jominy du point qui se refroidit selon la loi critique de transformation martensitique. (3) Teneur (%) en austénite résiduelle après trempe martensitique arrêtée à 20 ou -130 °C. (4) dJ > 70mm.

titre d'exemple, et pour un acier du type X40CrMoV5-1 trempé et revenu à 550 °C, ce que sont les évolutions de la dureté mesurée à la température ambiante après des réchauffages à différentes températures. On voit qu'ici la température de travail ne devrait pas dépasser 500/525 °C. Ces résultats permettent aussi d'interpréter les variations de la résistance à la traction d'un tel acier en fonction de la température qu'il atteint en service (figure 2). Au-dessous de 500/550 °C, la résistance à chaud est légèrement abaissée (d'une manière réversible) essentiellement par une plus grande facilité de glissement des dislocations. Au-dessus de 500/525 °C, le glissement et la montée des dislocations deviennent de plus en plus faciles, le fluage peut se développer et la structure commence à coalescer.

Les particularités métallurgiques des aciers rapides

Le groupe des aciers rapides dans la norme NF EN ISO 4957 comporte 16 nuances dont la spécificité réside dans le fait qu'elles sont alliées avec des éléments carburi-gènes comme les aciers alliés pour travail à chaud mais en proportions plus importantes. Ces aciers sont dits « rapides » car ils sont les « descendants » des aciers dits « à coupe rapide » créés par les métallurgistes américains à la fin du 19^e siècle et au début du 20^e siècle, aciers qui permirent d'augmenter grandement les vitesses de coupe. Le tableau 5 rappelle les teneurs moyennes en carbone et en éléments carburi-gènes des nuances définies par la norme NF EN ISO 4957. Il indique aussi quelle valeur prend le paramètre « tungstène équivalent » utilisé pour caractériser l'effet global dû aux additions

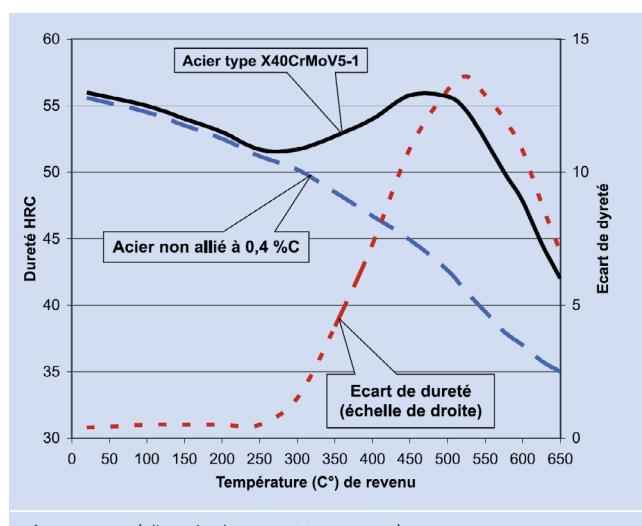


Figure 1 : Dureté d'un acier du type X40CrMoV5-1 après trempe et revenu.

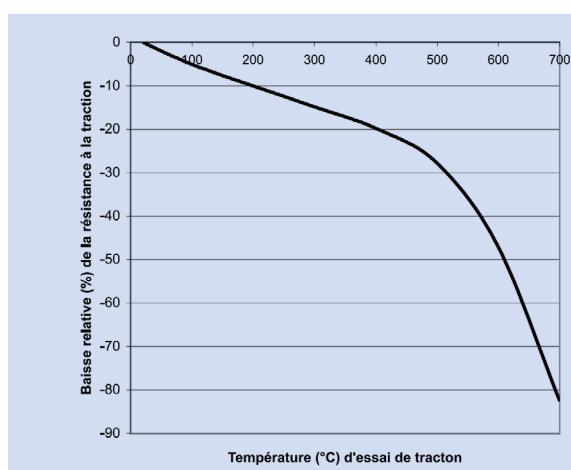


Figure 2 : Ordres de grandeur des évolutions de la résistance à la traction d'aciers à outils pour travail à chaud des types à 5 % de chrome.

d'éléments carburigènes. La figure 3 met en évidence la relation qui existe entre ce paramètre et la teneur en carbone.

Il faut rappeler ici que, avant la création de la norme NF EN ISO-4957, il était fréquent d'utiliser la dénomination « acier semi rapide » pour désigner des aciers dont le paramètre « tungstène équivalent » prenait une valeur inférieure à 20%. Les performances de ces aciers à outils étaient plus faibles que celles des aciers dits simplement « rapides ». On retrouve trois de ces nuances dans la norme NF EN ISO-4957, à savoir : HS0-4-1 HS1-4-2 et HS3-3-2.

La figure 3 montre à quel point elles sont (par rapport à leurs teneurs en carbone) moins chargées en éléments carburigènes et se trouvent, de ce fait, moins performantes. Nous ne les prendrons pas en compte dans ce qui suit.

Les compositions chimiques des aciers rapides définis par la norme NF EN ISO-4957 sont telles que le carbone n'est pas totalement soluble dans l'austénite à l'état solide. Lors des traitements comportant une austénitisation, il subsistera donc des carbures non dissous dispersés dans une matrice austénitique. Ces carbures peuvent être de trois types :

1. Carbures de chrome plus ou moins substitués en fer, molybdène, tungstène du type $M_{23}C_6$.
2. Carbures de tungstène et de molybdène plus ou moins substitués en fer du type M_6C .
3. Carbures de vanadium du type V_4C_3 .

Ces nuances sont caractérisées par leur capacité de durcissement que l'on peut quantifier en prenant en compte leur teneur en carbone et leur dureté à l'état trempé et revenu (tel que figurant dans la norme) ainsi que leur trempabilité vérifiée, selon la norme, à l'aide d'une mesure de dureté sur un échantillon type traité selon les conditions imposées.

A noter que leur trempabilité est telle que ce paramètre ne pose pas de problème dans la très grande majorité des cas pratiques. Le tableau 6 rassemble ces données.

Pour un acier donné la composition chimique de la matrice, les types de carbures, leurs proportions et leur composition chimique dépendent des conditions d'austénitisation qu'il faudra ajuster pour optimiser les performances des outils.

Le tableau 7, à titre d'exemple, décrit les évolutions, en fonction de la température d'austénitisation, de la composition chimique de la matrice d'un acier du type HS6-5-2C à l'état brut de trempe. Ce tableau donne des ordres de grandeur de certaines propriétés de cette même

Nuances	500 °C	550 °C	600 °C	650 °C
55NiCrMoV7	47	44	42	40
32CrMoV12-28	50	49	46	40
X37CrMoV5-1	56	52	46	39
X38CrMoV5-3	54	54	52	47
X40CrMoV5-1	56	52	48	42
50CrMoV13-15	51	49	47	44
X30WCrV9-3	51	52	51	45
X35CrWMoV5	59	54	50	44
38CrCoWV18-17-17	52	50	34	

Tableau 4 : Ordre de grandeur de la dureté HRC après trempe et revenu (1 heure).

Nuances	C	Cr	Mo	V	W	Co	We (**)
HS0-4-1	0,81	4,15	4,25	1			14,6
HS1-4-2	0,9	3,95	4,45	1,95	1,1		19,8
HS18-0-1	0,78	4,15		1,1	17,95		24,4
HS2-9-2	1	4	8,7	1,95	1,8		29,0
HS1-8-1	0,82	4	8,5	1,2	1,7		25,5
HS3-3-2	0,99	4,15	2,7	2,35	2,85		19,7
HS6-5-2	0,84	4,15	4,95	1,9	6,3		25,9
HS6-5-2C	0,9	4,15	4,95	1,9	6,3		25,9
HS6-5-3	1,2	4,15	4,95	2,95	6,3		30,1
HS6-5-3C	1,285	4,15	4,95	2,95	6,3		30,1
HS6-6-2	1,05	4,15	6	2,45	6,3		30,2
HS6-5-4	1,325	4,15	4,6	3,95	5,6		32,7
HS6-5-2-5	0,91	4,15	4,95	1,9	6,3	4,75	25,9
HS6-5-3-8	1,28	4,15	5	2,95	6,3	8,4	30,2
HS10-4-3-10	1,275	4,15	3,55	3,25	9,5	10	31,7
HS2-9-1-8	1,1	4	9,5	1,1	1,55	8	27,0

Tableau 5 : Composition chimique moyenne (%) des aciers rapides selon NF EN ISO 4957 (*).

(*) Pour toutes les nuances S ≤ 0,030 %, P ≤ 0,030 %, Mn ≤ 0,40 %. (** We = 0,5*(Cr %)+(W %)+2*(Mo %)+4(V %)).

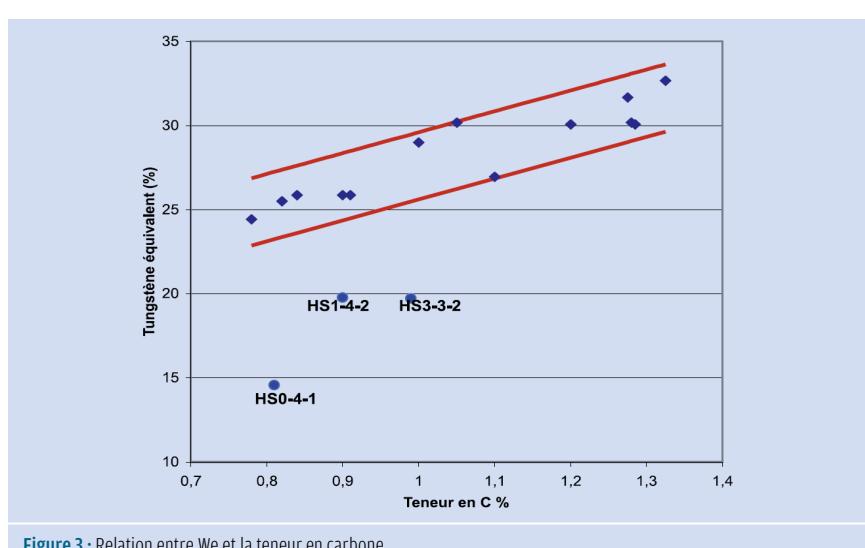


Figure 3 : Relation entre We et la teneur en carbone.

Nuances	Teneur moyenne en C (%)	Austénitisation (°C)		HRC après trempe et double revenu (*)	
		Conditions usuelles	Selon norme	Température de revenu	HRC
HS18-0-1	0,78	1240 à 1300	1260	560 °C	≥ 63
HS2-9-2	1	1180 à 1220	1200	560 °C	≥ 64
HS1-8-1	0,82	1180 à 1220	1190	560 °C	≥ 63
HS6-5-2	0,84	1190 à 1230	1220	560 °C	≥ 64
HS6-5-2C	0,9	1180 à 1220	1210	560 °C	≥ 64
HS6-5-3	1,2	1180 à 1230	1200	560 °C	≥ 64
HS6-5-3C	1,285	1190 à 1230	1180	560 °C	≥ 64
HS6-6-2	1,05	1205 à 1230	1200	560 °C	≥ 64
HS6-5-4	1,325	1205 à 1230	1215	560 °C	≥ 64
HS6-5-2-5	0,91	1180 à 1220	1210	560 °C	≥ 64
HS6-5-3-8	1,28	1100 à 1190	1180	560 °C	≥ 65
HS10-4-3-10	1,275	1200 à 1240	1230	560 °C	≥ 66
HS2-9-1-8	1,1	1170 à 1220	1190	550 °C	≥ 66

Tableau 6 : Niveaux de dureté des aciers rapides après trempe et revenu sur échantillon type selon norme NF EN ISO 4957.

(*) Selon conditions imposées par la norme NF EN ISO 4957.

Températures (°C) d'austénitisation	C %	Cr %	W %	Mo %	V %
950	0,3	4,0	2,1	1,2	0,8
1000	0,32	4,2	2,2	1,3	0,8
1050	0,35	4,3	2,3	1,4	0,84
1100	0,39	4,3	2,5	1,7	0,9
1150	0,44	4,3	2,7	2,1	1
1200	0,62	4,3	3,3	2,9	1,15
1250	0,68	4,3	3,8	3,6	1,3

Tableau 7 : Ordres de grandeur de la composition chimique (% en poids) de la matrice d'un acier HS6-5-2C après austénitisation à différentes températures.

Composition chimique de la matrice				
C %	Cr %	W %	Mo %	V %
0,38	5,3	8,5	0,46	0,68
Ordres de grandeur de certaines caractéristiques				
Ms	Mf	austénite résiduelle à 20 °C		
297 °C	-56 °C	4 %		

Tableau 8 : Ordres de grandeur de certaines caractéristiques de la matrice d'un acier HS18-0-1 après austénitisation à 1275 °C.

Température d'austénitisation	Ms	Mf	Austénite résiduelle	
			à 20 °C	à - 130 °C
950 °C	342 °C	35 °C	0 %	0 %
1000 °C	331 °C	11 °C	1 %	0 %
1050 °C	316 °C	-18 °C	2 %	0 %
1100 °C	297 °C	-56 °C	4 %	0 %
1150 °C	273 °C	-105 °C	6 %	0 %
1200 °C	191 °C	< -200 °C	16 %	5 %
1250 °C	160 °C	< -200 °C	21 %	8 %

Tableau 9 : Ordres de grandeur de certaines caractéristiques de la matrice d'un acier HS6-5-2C après austénitisation à différentes températures.

matrice. A titre de comparaison, le tableau 8 apporte les mêmes informations pour un acier du type HS18-0-1 austénitisé à 1275 °C.

On constate que la composition de la matrice en fait un acier allié à teneur en carbone assez élevée et dont la trempabilité est assurée notamment par la teneur en chrome. Compte tenu du haut niveau des températures d'austénitisation (1180 à 1220 °C pour l'acier HS6-5-2C, 1275 pour l'acier HS18-0-1) il subsistera de l'austénite résiduelle après trempe martensitique comme le montre le tableau 9. Un traitement par le froid peut en transformer une partie mais nous allons voir que le revenu va jouer ici un rôle particulier. Le tableau 10 décrit l'évolution, en fonction de la température d'austénitisation, des proportions des différents types de carbures non dissous présents dans un acier du type HS6-5-2C à l'état brut de trempe.

On voit que, dans l'exemple cité ici (acier du type HS6-5-2C), la mise en solution des carbures de type M_2C_6 se fait assez facilement à des températures relativement basses (≤ 1000 °C). Par contre celle des carbures des types M_6C et M_4C_3 ne commence qu'au-dessus de 1150 °C et elle ne s'achève pas à l'état solide. Le résidu solide constitue les carbures non dissous. Selon la température d'austénitisation, la composition de ces carbures peut aussi évoluer parfois. C'est ainsi, par exemple, que dans un acier du type HS6-5-2C le carbure M_4C_3 peut s'enrichir en vanadium lorsque la température s'élève au dessus de 1200 °C.

En ce qui concerne le revenu après trempe martensitique des aciers rapides, la norme prescrit un double revenu c'est-à-dire la réalisation de deux cycles comportant chacun chauffage et maintien à la même température suivi d'un refroidissement jusqu'à la température ambiante. Cette procédure (compte tenu du domaine de température dans lequel les revenus sont réalisés) provoque le revenu de la martensite formée lors de la trempe mais elle engendre aussi une évolution particulière de l'austénite résiduelle qui, pendant le maintien à la température lors du premier revenu, est le siège d'une précipitation de carbures qui la désature (on dit que l'austénite résiduelle est « sensibilisée » ou « déstabilisée »). De ce fait l'austénite résiduelle est appauvrie en carbone et en éléments d'alliage. Sa température Ms (dite alors M's) se trouve donc relevée et, lors du refroidissement qui clôt le premier revenu, elle

Flashback

34 | Traitements & Matériaux 491 Décembre 2024

se transforme en martensite (dite alors « secondaire »). Il devient donc nécessaire de stabiliser la structure à l'aide d'un revenu supplémentaire, le deuxième évoqué ci-dessus. Il faut noter ici que certains praticiens préconisent l'exécution de trois, voire quatre revenus successifs (surtout avec les aciers rapides au cobalt) pour transformer toute l'austénite résiduelle. En fait, comme le montre la figure 4 pour un acier HS6-5-2, il peut parfois suffire de deux revenus dans la mesure où leur température est bien choisie.

Pour sa part la norme NF EN ISO 4957 décrit les variations de la dureté en fonction de la température à laquelle ce double revenu est réalisé. Toutes les courbes dureté = f(température de double revenu) passent (comme le montre la figure 5) par une valeur maximale de la dureté qui correspond à une gamme de température de revenu comprise entre 525 °C et 575 °C. La pratique courante est de retenir une température comprise dans cet intervalle en tenant compte du fait que le choix d'une température proche du haut du domaine permet de diminuer un peu la fragilité de l'outil.

Température (°C) d'austénisation	total %	M ₂₃ C ₆ %	M ₆ C %	M ₄ C ₃ %
950	19,1	3,5	12,9	2,7
1000	18,3	2,7	12,9	2,7
1050	16,1	0,5	12,9	2,7
1100	14,3		11,6	2,7
1150	15,3		13,2	2,1
1200	12,8		11,6	1,2
1250	10,6		9,6	1

Tableau 10 : Proportions (%) pondérales des carbures non dissous après austénisation d'un acier HS6-5-2C à différentes températures.

Notons que la principale action qui détermine les propriétés d'usage des aciers rapides est le traitement thermique mais que, dans ce cadre, la température d'austénisation est le facteur prépondérant. Les figures 6 et 7 illustrent ce fait en prenant en compte les capacités de coupe de forets en aciers des types HS1-18-1 et HS6-5-2 trempés et doublement revenus à différentes températures. La capacité de coupe est ici caractérisée par la somme des longueurs des trous percés dans un

acier C70 recuit (dureté 200/220 HBW) avant usure des forets.

Enfin, on peut ajouter ici une mention relative à un traitement particulier des aciers rapides qui consiste à réaliser l'austénisation à des températures de l'ordre de 1050 à 1150 °C sans changer les conditions de revenu. La résistance à l'usure à froid ou à tiède est alors renforcée par la présence d'une forte proportion de carbures non dissous tandis que la ténacité est augmentée. ■

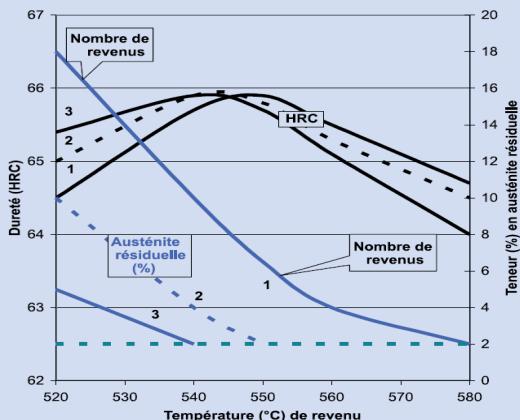


Figure 4 : Influences des températures et du nombre de revenus sur un acier du type HS6-5-2.

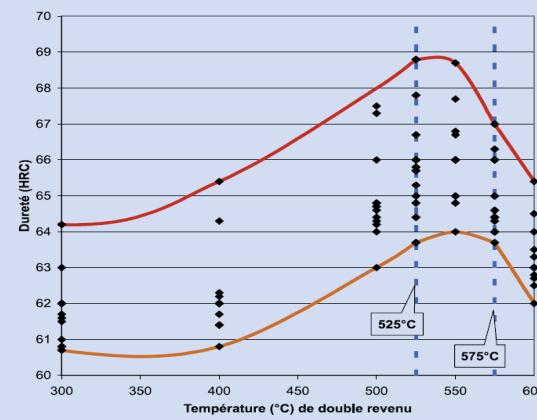


Figure 5 : évolutions de la dureté des aciers rapides en fonction de la température de double revenu selon la norme.

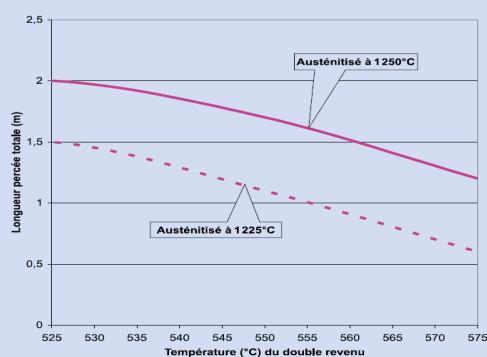


Figure 6 : Longueur totale percée avant usure par un foret en acier HS1-18-1 trempé à 1225 ou à 1250 °C.

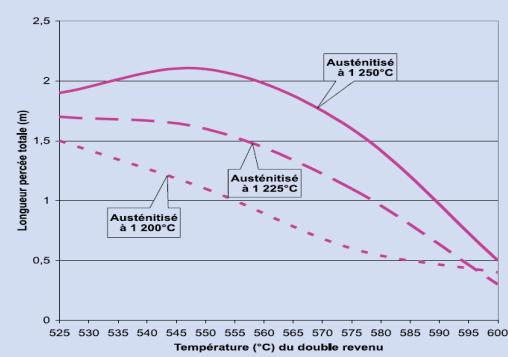


Figure 7 : Longueur totale percée avant usure par un foret en acier HS6-5-2 trempé à 1200, 1225 ou 1250 °C.