



FAITES DES ECONOMIES AVEC L'ACIER HLE

# DILLIMAX

INFORMATION TECHNIQUE N° III/2007

DILLINGER HÜTTE GTS







Juin 2007



---

## SOMMAIRE

4

### **Allégez vos constructions métalliques**

6

### **La fabrication de DILLIMAX**

Elaboration de l'acier  
Laminage des tôles fortes  
Trempe à l'eau et revenu

8

### **Propriétés de matériau de DILLIMAX**

Résistance et ténacité  
Caractéristiques dans le sens de l'épaisseur  
Résistance mécanique aux températures élevées

12

### **Mise en œuvre de DILLIMAX**

Formage à froid  
Formage à chaud  
Formage aux températures de recuit de détensionnement  
Découpage thermique  
Soudage  
Recuit de détensionnement  
Chaude de retrait  
Galvanisation à chaud  
Usinage

38

### **Propriétés des éléments de construction en DILLIMAX**

44

### **Bibliographie**

46

### **Glossaire**



## ALLEGEZ VOS CONSTRUCTIONS METALLIQUES

Les constructions métalliques telles que les flèches de grues, les châssis de véhicules utilitaires lourds, les châssis fixes, les portes d'écluses ou les charpentes de ponts doivent présenter une limite de charge très élevée. Exiger parallèlement que de telles constructions satisfassent aux principes de la construction allégée – réduction du volume de matériau nécessaire, mise en œuvre aisée – aurait été très difficile à réaliser il y a quelques années encore. Aujourd'hui par contre, il est tout à fait possible de satisfaire à ces deux exigences.

Nous souhaitons vous présenter une famille d'aciers qui vous permettront de réaliser des constructions à haute limite de charge et d'une grande fiabilité, tout en réduisant les coûts de matériau et de fabrication jusqu'à 50 % : les aciers DILLIMAX de DILLINGER HÜTTE GTS.

Des fabricants renommés d'engins de travaux publics utilisent quotidiennement les aciers DILLIMAX et d'importants ouvrages en acier ont été construits avec leur aide. Soit mentionné ici le Sony Center à Berlin, dont l'impressionnante charpente a pu être réalisée grâce à DILLIMAX 690 (voir figure 15, p. 27). Ces exemples font ressortir les deux aspects



*Figure 1 : Sans les aciers HLE tels que DILLIMAX, il serait impossible de construire des flèches de grues d'une telle longueur (photo publiée avec l'aimable autorisation de Demag Mobile Cranes GmbH, Zweibrücken, Allemagne)*

essentiels de l'utilisation de DILLIMAX : réduction importante du poids mort des constructions et plus grande maniabilité des engins et véhicules qui consomment également moins d'énergie.

Les aciers DILLIMAX appartiennent à la famille des aciers de construction HLE à grain fin ; ils allient une bonne soudabilité à une résistance très élevée ainsi qu'à une excellente ténacité. Cette résistance permet de réduire considérablement l'épaisseur des tôles dans les constructions mécaniques par rapport aux aciers conventionnels, contribuant ainsi à réduire les coûts de matériau. La ténacité très élevée, qui va de pair avec d'excellentes caractéristiques d'usinabilité, permet également de limiter les coûts de mise en œuvre. Ceci se ressent en particulier dans le cas du soudage, où la réduction d'épaisseur se traduit directement par une diminution de la quantité de consommables.

La gamme d'aciers DILLIMAX propose toute une palette de valeurs de résistance adaptées à chaque utilisation : DILLIMAX 500, 550, 690, 890, 965 et 1100. Notre programme de fabrication donne les dimensions auxquelles les aciers DILLIMAX sont



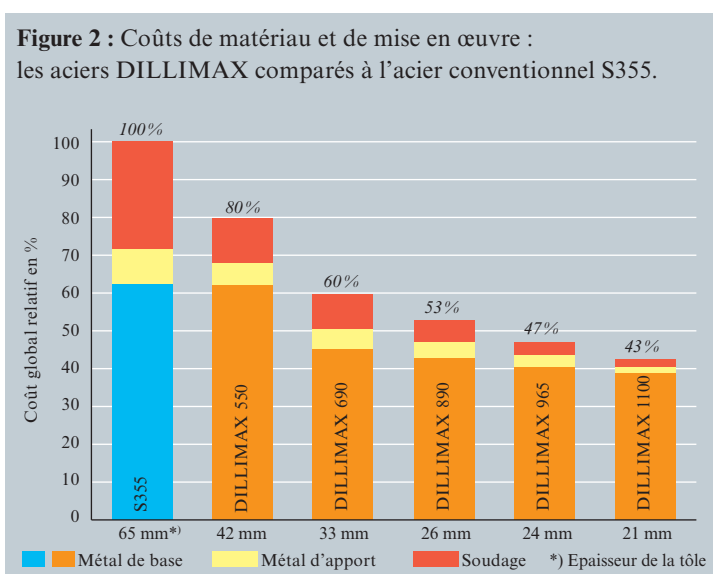
disponibles de façon standard. En outre, des dimensions spéciales peuvent éventuellement être réalisées après consultation.

La figure 2 montre comment minimiser les coûts de matériau et de mise en œuvre en utilisant les aciers DILLIMAX à la place d'aciers conventionnels de la qualité S355.

Les aciers DILLIMAX sont internationalement reconnus. La norme européenne EN 10025-6 décrit les exigences auxquelles doivent satisfaire les aciers destinés à la réalisation d'ouvrages soudés exposés à de fortes sollicitations (par exemple grues, immeubles, ponts ou portes d'écluses) et également à de basses températures d'utilisation.

Les aciers DILLIMAX satisfont à ces exigences et les dépassent même dans de nombreux cas. L'institut allemand de la technique de construction (Deutsches Institut für Bautechnik, DIBT) autorise l'utilisation de DILLIMAX 690 E (S690QL1) pour les constructions métalliques du domaine supervisé par la surveillance des chantiers (autorisation générale de la surveillance des chantiers n° Z-30.1-1). Cette autorisation s'applique aux constructions métalliques selon DIN 18800.

**Figure 2 :** Coûts de matériau et de mise en œuvre : les aciers DILLIMAX comparés à l'acier conventionnel S355.



L'Eurocode 3, partie 1.12 (pr EN 1993-1-12: 2005), tient compte des nuances d'acier DILLIMAX 500 B/T/E (S500Q/QL/QL1), DILLIMAX 550 B/T/E (S550Q/QL/QL1) et DILLIMAX 690 B/T/E (S690Q/QL/QL1).

Une évaluation de conformité ainsi qu'un marquage CE peuvent être exigés à des fins réglementaires selon la directive produits de construction pour les nuances d'acier DILLIMAX suivantes : DILLIMAX 500, 550 et 690 B/T/E (jusqu'à 150 mm d'épaisseur de tôle), DILLIMAX 890 B/T/E (jusqu'à 100 mm d'épaisseur de tôle), DILLIMAX 965 B/T/E (jusqu'à 50 mm d'épaisseur de tôle). Pour l'utili-

sation dans le domaine supervisé par la surveillance des chantiers, il faut également tenir compte des réglementations spéciales.

Les données de cette brochure s'appliquent par analogie aux produits de la norme EN 10028-6 «Produits plats en aciers pour appareils à pression – Partie 6 : Aciers soudables à grains fins, trempés et revenus».

Les pages suivantes vous présentent les caractéristiques des aciers DILLIMAX et vous montrent comment ils sont fabriqués et comment les mettre en œuvre pour fabriquer à moindre coût des constructions métalliques résistant à de fortes sollicitations.



## LA FABRICATION DE DILLIMAX

Les aciers DILLIMAX doivent leur résistance très élevée et leur ténacité non seulement à l'ajout ciblé d'éléments d'alliage, mais également à un procédé de fabrication spécifique : après laminage, les tôles fortes sont trempées à l'eau et revenues. Les différentes étapes de fabrication – élaboration de l'acier, formage des tôles fortes, trempe à l'eau et revenu – sont coordonnées avec précision pour chaque coulée d'acier.

### Elaboration de l'acier

Après une désulfuration soignée, les aciers DILLIMAX sont affinés par insufflation d'oxygène, puis traités en poche pour obtenir l'analyse souhaitée. La soli-

dification s'effectue par coulée continue pour les formats usuels de tôles. Dans le cas de tôles de forte épaisseur ou de poids unitaire élevé, on a recours au procédé de coulée en lingots.

La ténacité élevée de DILLIMAX présuppose de faibles teneurs en phosphore et en soufre. En règle générale, la teneur en phosphore ne dépasse pas 0,020 % et la teneur en soufre 0,005 %. La teneur en éléments d'alliage est également fixée avec précision au niveau de la poche de coulée, réalisant ainsi un compromis optimal entre des propriétés mécaniques très élevées et une mise en œuvre aisée. Le carbone équivalent (CEV, PCM et/ou CET), qui augmente

parallèlement à la teneur en éléments d'alliage, fait l'objet d'une attention particulière. En effet, une faible valeur de carbone équivalent est un indice de bonne soudabilité. Cependant, un minimum d'éléments d'alliage est nécessaire pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées à l'issue du traitement de trempe et de revenu. Ce minimum augmente avec l'épaisseur de la tôle.

Toutefois, les aciers DILLIMAX offrent des valeurs de carbone équivalent qui se situent bien en-dessous des valeurs limites maximales données dans la norme EN 10025-6.

**Tableau 1 :** Carbone équivalent de DILLIMAX 690 à 1100 (valeurs données à titre indicatif)

DILLIMAX	690				890			965		1100
	10	40	100	180	10	40	70	10	40	10
CEV	0,40	0,51	0,63	0,71	0,57	0,60	0,67	0,57	0,60	0,77
PCM	0,24	0,29	0,32	0,34	0,30	0,31	0,33	0,30	0,31	0,32
CET	0,29	0,34	0,38	0,41	0,35	0,36	0,39	0,35	0,36	0,37

#### Carbone équivalent:

$$\text{CEV} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15$$

$$\text{PCM} = \text{C} + \text{Si}/30 + (\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr})/20 + \text{Mo}/15 + \text{Ni}/60 + \text{V}/10 + 5 \times \text{B}$$

$$\text{CET} = \text{C} + (\text{Mn} + \text{Mo})/10 + (\text{Cr} + \text{Cu})/20 + \text{Ni}/40$$



Le tableau 1 donne à titre indicatif des valeurs du carbone équivalent pour DILLIMAX 690 à 1100.

#### **Laminage des tôles fortes**

DILLINGER HÜTTE GTS dispose de deux des cages de laminage les plus performantes au monde. Les brames produites à l'aciérie y sont laminées conformément à un schéma de laminage précis et adapté à la composition chimique de la coulée. Les forces de laminage très élevées (jusqu'à 108 000 kN / 11 000 t), permettent de déformer la tôle à cœur même pour les fortes épaisseurs. La microstructure ainsi obtenue se prête parti-

culièrement bien au traitement de trempe à l'eau et de revenu, contribuant à conférer aux aciers DILLIMAX de bonnes propriétés de résistance et de ténacité.

La reproductibilité du processus de laminage en termes de température, de force de laminage, et de réduction d'épaisseur à chaque passe est assurée par une mesure exacte et une régulation rapide des paramètres de laminage.

#### **Trempe à l'eau et revenu**

Après laminage, les tôles fortes sont portées à la température d'austénitisation et refroidies ensuite à l'eau dans une installa-

tion spéciale. La vitesse de refroidissement très élevée pendant la trempe à l'eau permet d'obtenir une microstructure à grain fin et dureté élevée. Le traitement de revenu consécutif influence cette microstructure par des processus d'adoucissement et de précipitation, aboutissant à une résistance et une ténacité élevée. Le traitement de revenu prend en compte la composition chimique et l'épaisseur de la tôle, afin d'obtenir les propriétés de résistance et de ténacité souhaitées.

La figure 3 présente la microstructure typique à grain fin de DILLIMAX après le traitement de trempe et de revenu.

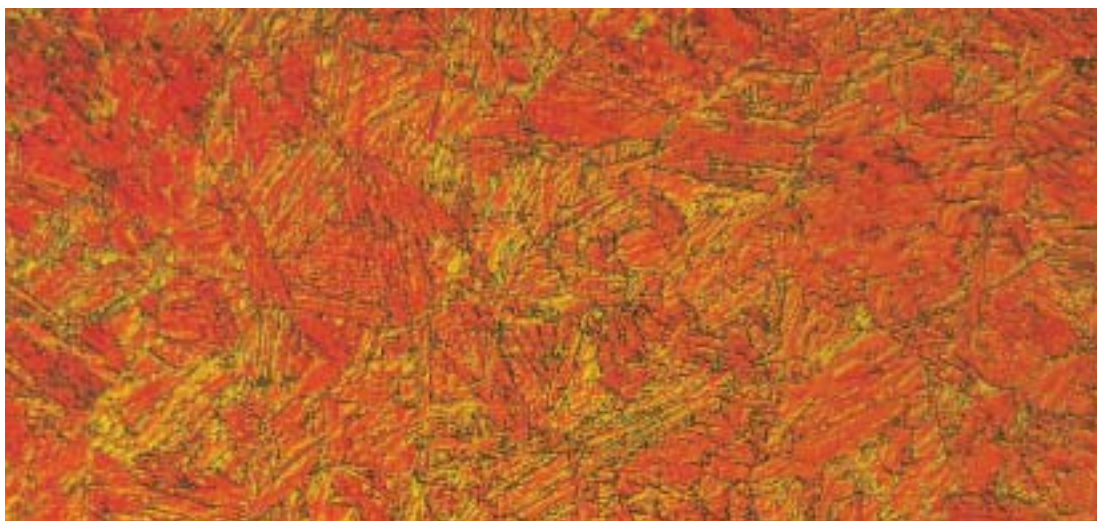


Figure 3 : Microstructure typique de DILLIMAX (grossissement 500x)



## PROPRIETES DE MATERIAU DE DILLIMAX

### Résistance et ténacité

Les aciers DILLIMAX présentent des caractéristiques de résistance qui dépassent de loin celles des aciers conventionnels. Le tableau 2 résume les valeurs minimales de la limite d'élasticité ; le tableau 3 présente les

valeurs minimales de résistance à la traction ainsi que les valeurs minimales d'allongement à la rupture.

Malgré leur résistance élevée, les aciers DILLIMAX possèdent d'excellentes propriétés de ténacité (cf. tableau 4). Trois classes

de ténacité sont disponibles : qualité de base (B) avec des valeurs minimales de résilience à -20 °C, qualité tenace (T) avec des valeurs minimales de résilience à -40 °C et qualité extra tenace (E) avec des valeurs minimales de résilience à -60 °C.

**Tableau 2 :** Valeurs minimales de la limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur de la tôle

Limite d'élasticité  $R_{eH}$  en MPa ( $R_{p0,2}$  si celle-ci n'est pas apparente)

Épaisseur (mm)	30	50	60	65	80	100	150	200
DILLIMAX 500	500			480			440	—
DILLIMAX 550	550			530			490	—
DILLIMAX 690		690				670 <sup>1)</sup>	630 <sup>1)</sup>	610 <sup>1)</sup>
DILLIMAX 890	890			850		830	—	—
DILLIMAX 965	960		930		850		—	—
DILLIMAX 1100	1100	—	—	—	—	—	—	—

<sup>1)</sup> Il est possible sur consultation de convenir de valeurs minimales plus élevées.



**Tableau 3 :** Valeurs minimales de la résistance à la traction et de l'allongement à la rupture en fonction de l'épaisseur de la tôle

Résistance mécanique $R_m$ en MPa							Allongement à rupture $A_5$ en % <sup>2)</sup>	
Epaisseur (mm)	30	50	60	80	100	150	200	toutes épaisseurs
DILLIMAX 500	590 – 770				540 – 720		—	17
DILLIMAX 550	640 – 820				590 – 770		—	16
DILLIMAX 690	770 – 940				720 – 900 <sup>1)</sup>		700 – 880 <sup>1)</sup>	14
DILLIMAX 890	940 – 1100		900 – 1100		880 – 1100		—	12
DILLIMAX 965	980 – 1150		950 – 1120		900 – 1100		—	12
DILLIMAX 1100	1200 – 1500		—		—		—	10

<sup>1)</sup> Il est possible sur consultation de convenir de valeurs minimales plus élevées.

<sup>2)</sup> Valeur minimum de l'allongement à rupture.

**Tableau 4 :** Valeurs minimales de résilience pour les aciers DILLIMAX (éprouvettes Charpy-V)

DILLIMAX 500–965	Sens de l'éprouvette	Energie de rupture $A_v$ [J] pour une température d'essai de			
		0 °C	-20 °C	-40 °C	-60 °C
acier de base (B)	long/travers	40/30	30/27	—	—
acier tenace (T)	long/travers	50/35	40/30	30/27	—
acier extra tenace (E)	long/travers	60/40	50/35	40/30	30/27

Pour DILLIMAX 1100, la valeur minimale de l'énergie de rupture est de 30 J en sens long et 27 J en sens travers à -40 °C.



*Figure 4 : Excavatrice hydraulique RH 400 de la société O&K : éléments portants en DILLIMAX 690 T  
(photo publiée avec l'aimable autorisation d'Orenstein & Koppel AG, Dortmund, Allemagne)*



### Caractéristiques dans le sens de l'épaisseur

Les tôles qui, pour des raisons de construction ou de fabrication, sont soumises à d'importantes sollicitations dans le sens de l'épaisseur, exigent une résistance accrue contre l'arrachement lamellaire.

Cela doit être pris en compte lors de la fabrication de l'acier en fixant un procédé de fabrication particulier.

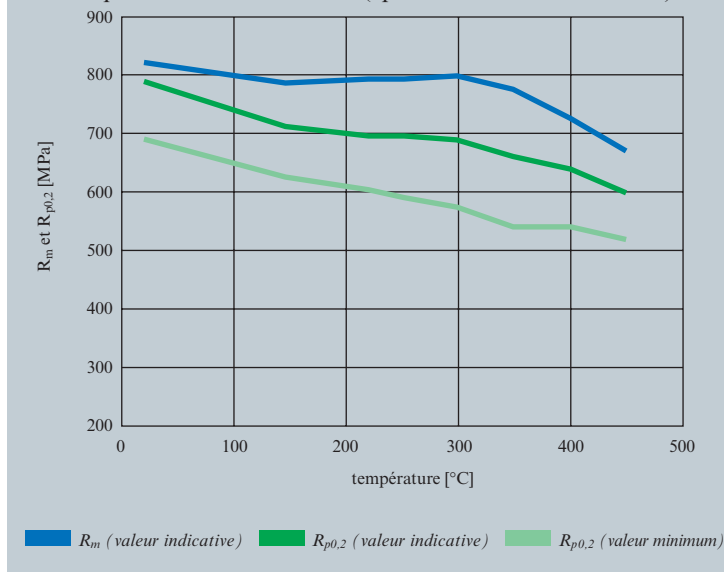
Il est ainsi possible, par exemple, de commander après accord préalable DILLIMAX 690 conformément à la classe de qualité Z35 selon EN 10164 dans une large gamme d'épaisseurs.

### Résistance mécanique aux températures élevées

L'utilisation ciblée d'éléments d'alliage et le traitement spécial de trempe et revenu confèrent aux aciers DILLIMAX une

bonne résistance aux températures élevées jusqu'à 500 °C (cf. figure 5). Des valeurs minimales peuvent être garanties pour la limite élastique à chaud sur accord préalable.

**Figure 5 :** Influence de la température sur les caractéristiques mécaniques de DILLIMAX 690 (épaisseur de la tôle ≤ 50 mm)





## MISE EN ŒUVRE DE DILLIMAX

De manière générale, il faut tenir compte du fait que la mise en œuvre exige des précautions accrues lorsque les valeurs minimales de limite d'élasticité des aciers et/ou l'épaisseur de tôle augmentent, de façon à exclure une diminution des propriétés mécaniques non acceptable.

Il faut également prendre en considération le fait que la composition chimique des aciers DILLIMAX varie en fonction de l'épaisseur de tôle, ce qui entraîne des différences dans l'aptitude à la mise en œuvre.

Une conception tenant compte des opérations de soudage à réaliser et des sollicitations à envisager pour l'application prévue est une condition fondamentale pour utiliser avec succès les aciers à grains fins HLE. L'utilisateur doit s'assurer, à l'aide des normes correspondantes, que ses procédés de calcul, de construction et de fabrication sont adaptés à l'acier, qu'ils correspondent aux règles de l'art que le fabricant doit respecter et qu'ils conviennent pour l'utilisation envisagée.

Cette brochure donne des indications de base pour la mise en œuvre des aciers DILLIMAX. Il est évident que toutes les possibilités et conditions aux limites ne peuvent pas être prises en compte. En cas de questions spéciales, veuillez vous adresser à DILLINGER HÜTTE GTS.

### Formage à froid

Les aciers DILLIMAX sont faciles à mettre en forme à froid par cintrage ou par pliage. Il faut cependant tenir compte de l'augmentation des forces nécessaires à la déformation d'une épaisseur de tôle donnée lorsque la limite d'élasticité de l'acier augmente. Le retour élastique augmente également.

Pour éviter le risque de fissuration partant des bords, il convient de meuler ou d'usiner les rives cisailées ou oxycoupées dans la zone de formage à froid. Il faut également éliminer les bavures et briser les arêtes. De même, il est nécessaire de meuler les stries de coupe profondes pour éviter effet d'entaille et

concentration de contraintes lors du formage. Les entailles en surface de tôle (par exemple marquage par poinçons) augmentant le risque de formation de fissure, elles doivent être évitées dans la zone de formage.

L'allongement à la rupture d'un acier diminue au fur et à mesure qu'augmente sa limite d'élasticité. Il convient de tenir compte de cette loi lors du formage en adaptant l'allongement plastique maximal appliqué à la classe de limite d'élasticité. L'allongement plastique en surface de tôle se produisant lors du pliage dépend du rayon de pliage ( $r$ ) et de l'épaisseur de tôle ( $t$ ) et s'obtient par la formule suivante : Allongement (%) =  $100/(1+2r/t)$ .

Si l'on prend comme hypothèse une vitesse de déformation maximale donnée (moins de 10 % d'allongement par seconde dans la fibre extérieure), il en découle des valeurs indicatives pour le rayon de pliage et l'ouverture de matrice minimum pour le formage à froid de DILLIMAX (cf. tableau 5).



**Figure 6 :** *Eléments de conduites en DILLIMAX 690 utilisés dans les conduites forcées de la centrale hydroélectrique Kárahjúcar  
(photo publiée avec l'aimable autorisation de l'entreprise DSD Noell GmbH, Würzburg, Allemagne)*



Le formage à froid entraîne un écrouissage de l'acier qui s'accompagne d'une diminution de la ténacité. Ceci est mis en évidence dans l'essai de résilience où la déformation provoque une augmentation de la température

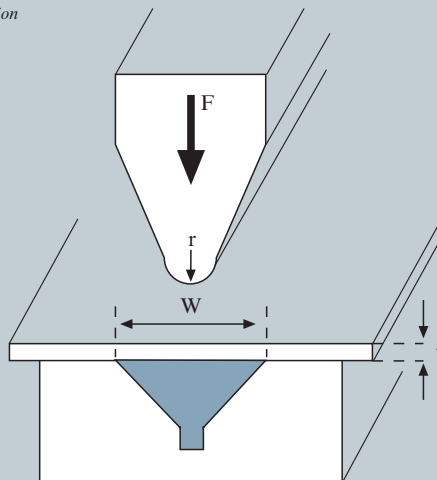
de transition  $T_{27J}$ , température à laquelle l'énergie de résilience descend au-dessous de 27 J (décalage de la courbe vers des températures plus élevées). Ce décalage de la température de transition est pratiquement le

même pour les aciers trempés et revenus et les aciers normalisés, et l'expérience a montré qu'il s'élève en moyenne à 5 °C par % de déformation à froid.

**Tableau 5 :** Rayon de pliage et ouverture de matrice minimum pour le formage à froid des aciers DILLIMAX

DILLIMAX	500		550		690		890 , 965		1100	
Direction de pliage par rapport au sens de laminage	sens travers	sens long	sens travers	sens long	sens travers	sens long	sens travers	sens long	sens travers	sens long
Rayon de pliage	1t	1,5t	1,5t	2,5t	2t	3t	3t	4t	5t	6t
Ouverture de matrice	6t	7t	6t	7t	7t	9t	9t	12t	14t	16t

*t = épaisseur de la tôle ; durée de déformation > 2 s pour un angle de pliage de 90°.*





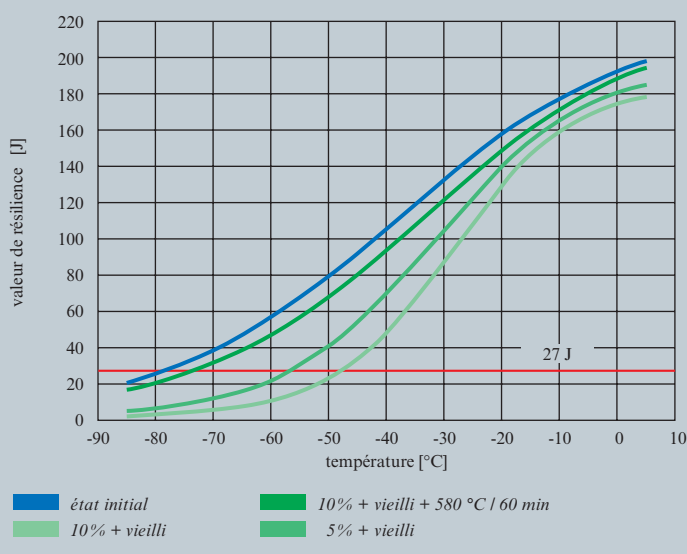
Par ailleurs, il faut compter avec une réduction supplémentaire de la ténacité due au vieillissement, un phénomène de fragilisation auquel sont sujets les aciers formés à froid au fil du temps. Ce phénomène peut prendre plusieurs années à température ambiante, mais ne met que quelques minutes à 200 °C. Le vieillissement peut également être accéléré lors du soudage dans les zones déformées à froid.

Les réserves de ténacité de l'acier à l'état initial, le degré de déformation à froid ainsi que la plus basse température de service de la pièce sont décisifs pour la résistance à la rupture fragile d'un acier mis en forme à froid.

La figure 7 montre à l'aide de courbes de résilience en fonction de la température que la déformation à froid et le vieillis-

sement des aciers DILLIMAX n'entraînent pas une diminution de la ténacité supérieure à la moyenne.

**Figure 7 :** Influence de la déformation à froid, du vieillissement et du recuit de détensionnement sur la courbe résilience-température de DILLIMAX 690 T (épaisseur 30 mm)





Un recuit pratiqué après formage à une température voisine de celle du recuit de détensionnement (cf. chapitre “Recuit de détensionnement”, p. 33) permet de réduire l’effet de fragilisation dû au vieillissement.

Suivant le type d’utilisation des aciers DILLIMAX, il existe différents ensembles de règles qui déterminent le taux de déformation à froid maximum autorisé et prescrivent des traitements thermiques correspondants. De plus, le soudage dans les zones fortement déformées à froid (par exemple > 5 %) est proscrit dans certains ensembles de règles. S’il est prévu de procéder à un recuit de détensionnement de la pièce après soudage, on peut éventuellement renoncer à un recuit séparé après le formage à froid.

#### **Formage à chaud**

Lorsque la construction prévoit des rayons de pliage étroits et de fortes épaisseurs, il peut être avantageux d’effectuer la mise en forme à des températures

plus élevées, étant donné que les forces nécessaires à la mise en forme diminuent. Toutefois, cette méthode présente un sérieux inconvénient : en général, le formage à chaud se fait à une température supérieure à la température maximale autorisée pour le recuit de détensionnement. Dans cette plage de température, les aciers DILLIMAX perdent systématiquement leurs caractéristiques mécaniques initiales résultant du traitement de trempe et revenu.

Il n’est donc pas possible d’effectuer un formage à chaud des aciers DILLIMAX si ce formage n’est pas suivi d’une nouvelle trempe.

Même en cas de nouvelle trempe suivie d’un revenu, les caractéristiques mécaniques des aciers DILLIMAX peuvent se dégrader. DILLINGER HÜTTE GTS ne peut garantir de résultats satisfaisants à l’issue de la nouvelle trempe. En effet, l’expérience montre que les performances des dispositifs de traitement thermique varient beau-

coup d’un utilisateur à l’autre. Par ailleurs, la géométrie des pièces est plus complexe que celle de la tôle brute, ce qui rend difficile l’obtention de bons résultats lors de la trempe. Si les pièces doivent être trempées au cours de la fabrication, il convient de prendre contact avec DILLINGER HÜTTE GTS afin de prévoir l’adaptation en conséquence de la composition chimique.

Si une nouvelle trempe suivie de revenu est prévue, l’austénitisation des aciers DILLIMAX doit avoir lieu si possible à une température comprise entre 900 et 950 °C. Lors de la trempe à l’eau consécutive, il faut s’assurer de l’évacuation rapide de la chaleur, afin d’obtenir un durcissement suffisant dans l’épaisseur. Les conditions de revenu dépendent de la composition chimique, des dimensions ainsi que des propriétés mécaniques visées et doivent également être fixées en concertation avec DILLINGER HÜTTE GTS.



### **Formage aux températures de recuit de détensionnement**

Par définition, ce procédé appartient à la catégorie du formage à froid. La limite d'élasticité dans la plage de température de déformation est déjà sensiblement inférieure à celle que l'on observe à température ambiante. Les forces nécessaires au formage diminuent donc en proportion, et ce sans que la microstructure issue du traitement de trempe et revenu ne soit sensiblement modifiée. De plus, la ténacité se dégrade moins que dans le cas de la déformation à froid à température ambiante.

Il est possible de mettre en forme les aciers DILLIMAX sans trempe consécutive si la température de formage reste au moins 50 à 80 °C en-deçà de la température de revenu chez le producteur et si le taux de déformation est inférieur à 2 %.

Si le taux de déformation est plus élevé, il faut vérifier que les caractéristiques mécaniques de l'acier (ténacité, allongement à

rupture) sont encore suffisantes après formage.

### **Découpage thermique**

L'oxycoupage, ainsi que le découpage plasma ou laser des aciers DILLIMAX ne posent pas de difficultés particulières à condition de travailler dans les règles de l'art, avec des outils de qualité et adaptés à la mise en œuvre prévue.

Les différents fabricants ayant mis au point des outils divers, il convient de respecter les valeurs de référence et les indications figurant dans les tableaux de découpage (choix des busettes, pression des gaz, mode opératoire, vitesse, etc.).

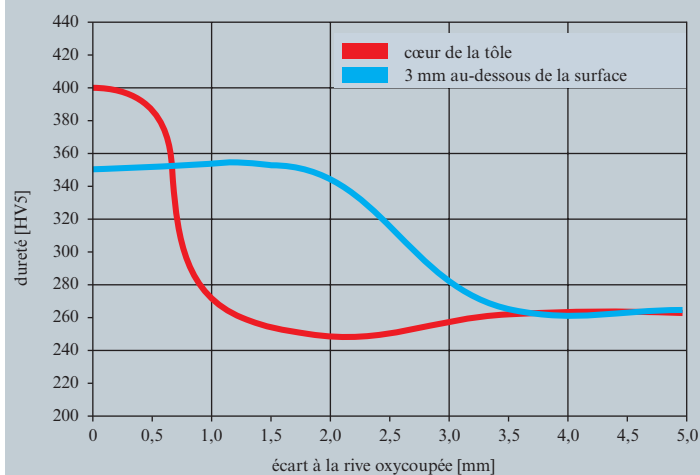
L'état de surface des produits a également une influence marquée sur le bon déroulement de l'oxycoupage et la qualité de la surface de coupe. Si les exigences de qualité de la surface de coupe sont élevées, il est indispensable de retirer de la zone de coupe toute trace de calamine, de rouille, de peinture ou

autres impuretés sur la face supérieure et inférieure de la tôle. Dans la plupart des cas, il n'est pas nécessaire de préchauffer DILLIMAX 500 pour l'oxycoupage et le découpage par fusion, à condition que la température de la pièce à découper soit d'au moins 15 °C. Cependant, si les rives sont destinées à un formage à froid, par exemple par cintrage ou pliage, il convient, pour les aciers DILLIMAX de limite élastique plus élevée, de préchauffer une bande d'une largeur d'environ 100 millimètres au voisinage de la zone de déformation à une température de 120 à 200 °C. On peut également supprimer les zones durcies suite à l'oxycoupage en les meulant dans la zone de formage prévue.

La figure 8 présente des courbes typiques de durcissement par trempe dans la zone affectée thermiquement (Z.A.T.) des rives oxycoupées de DILLIMAX 690. Pour les aciers DILLIMAX 550 à 1100, nous recommandons de respecter des températures de préchauffage minimales pour l'oxycoupage (cf. tableau 6).



**Figure 8 :** Profils de dureté de DILLIMAX 690 après oxycoupage (valeurs données à titre indicatif, épaisseur de la tôle : 20 à 30 mm)



**Tableau 6 :** Températures de préchauffage minimum pour l'oxycoupage de DILLIMAX 550 à 1100

Epaisseur [mm]	< 20	< 50	< 100	> 100
DILLIMAX 550	25 °C	25 °C	50 °C	100 °C
DILLIMAX 690	25 °C	50 °C	100 °C	150 °C
DILLIMAX 890	50 °C	100 °C	150 °C	—
DILLIMAX 965	50 °C	100 °C	—	—
DILLIMAX 1100	75 °C	125 °C <sup>1)</sup>	—	—

<sup>1)</sup> DILLIMAX 1100 est livrable jusqu'à 30 mm d'épaisseur ; autres dimensions sur consultation préalable.



*Figure 9 : Découpage autogène de DILLIMAX 690 T*



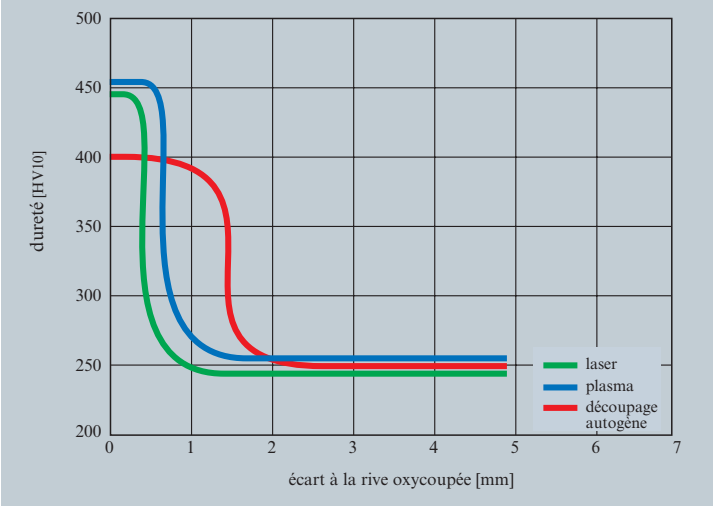
### Découpage au laser et découpage plasma :

Les principaux avantages du découpage au laser et plasma sont les suivants : un découpage plus performant, des saignées étroites et un apport thermique très faible. Ces deux méthodes de découpage permettent de couper des pièces de petite taille et des lamelles sans déformation et sans perte de dureté. Avec ces procédés, on peut également renoncer à un préchauffage.

Le découpage au laser n'est possible que si l'état de surface des tôles est excellent, étant donné que le rayon laser doit être focalisé par réflexion sans pertes et absorbé sans perturbation dans le foyer.

Pour répondre à ce cas particulier, tous les aciers DILLIMAX peuvent être livrés grenailés et peints sur demande. Les résultats obtenus lors du découpage dépendent dans une grande mesure de la puissance du laser et de l'épaisseur de la tôle à découper. Avec une tôle de 10 mm d'épaisseur et une puis-

**Figure 10 :** Influence de différentes méthodes d'oxycoupage sur la zone affectée thermiquement d'un acier de construction à grain fin, trempé à l'eau et revenu de limite d'élasticité 690 MPa



sance de 2-3 kW, on peut atteindre des vitesses de coupe de 2000 mm/min. Un traitement approprié de la surface, par exemple l'emploi d'une émulsion, peut dans certaines conditions améliorer la performance.

Contrairement au découpage laser, le découpage plasma est également adapté aux épaisseurs

supérieures à 30 mm. La zone affectée thermiquement est toutefois un peu plus large. La figure 10 montre l'impact des différentes méthodes de découpage sur la zone affectée thermiquement d'un acier de construction HLE à grain fin trempé et revenu.



## Soudage

**Soudabilité :** les aciers DILLIMAX peuvent être soudés à l'aide des procédés usuels, à condition de respecter les règles techniques générales du soudage (EN 1011, cf. chapitre "Bibliographie", p. 44) ainsi que les recommandations ci-après. Le soudage à l'arc sous flux solide peut être utilisé pour toutes les qualités jusqu'à DILLIMAX 690, le soudage manuel à l'arc jusqu'à DILLIMAX 890 et le soudage à l'arc sous protection gazeuse jusqu'à DILLIMAX 965. Plus la limite d'élasticité est élevée, plus grand est le soin à apporter à la mise en œuvre, en particulier au contrôle de l'apport de chaleur lors du soudage.

DILLINGER HÜTTE GTS signale que les recommandations émises ci-dessous concernant le soudage ont un caractère purement indicatif.

Les diverses conditions de soudage, la construction et les métaux d'apport utilisés ont une influence prépondérante sur la qualité du joint soudé. Etant donné que nous ne connaissons pas les

conditions de soudage spécifiques aux différentes entreprises, nous ne pouvons garantir a priori ni les propriétés mécaniques des soudures ni l'absence de défauts. DILLINGER HÜTTE GTS prévoit cependant de bons résultats si les conditions de soudage pratiquées sont appropriées.

**Préparation du cordon de soudure :** Le cordon de soudure peut être préparé par usinage ou par découpage thermique (oxycoupage, plasma, laser). Au début de l'opération de soudage, la zone de soudure doit présenter un éclat métallique, être sèche et exempte de scories d'oxycoupage, de rouille, de calamine, de peinture et autres impuretés.

**Métaux d'apport et consommables secondaires :** Les métaux d'apport doivent être choisis en fonction des exigences auxquelles doivent satisfaire les propriétés mécaniques. Les premières passes (racine de la soudure) peuvent, en raison du mélange entre métal de base et métal d'apport, être soudées avec un métal d'apport plus mou que pour les passes suivantes de

remplissage et de finition. Ceci s'applique également aux soudures d'angle partiellement sollicitées. Ici aussi, il est souvent possible de recourir à des métaux d'apport "plus mous" si l'on augmente l'épaisseur du cordon de soudure.

Pour le soudage manuel à l'arc, on utilise pour des raisons de ténacité des électrodes en baguettes à enrobage basique. Les électrodes de ce type ont deux avantages : la résilience du métal déposé est plus élevée (en particulier à basse température) lorsque les températures sont basses, et leur apport en hydrogène est inférieur à celui de tous les autres types d'enrobage.

Il faut s'assurer que le séchage et le stockage se fassent en suivant scrupuleusement les indications du fabricant. Pour des raisons analogues, il est conseillé de n'utiliser que des poudres basiques pour le soudage à l'arc sous flux solide.

Vous trouverez dans le tableau 7 une liste de métaux d'apport appropriés.



**Tableau 7 : Métaux d'apport et consommables secondaires pour le soudage des aciers DILLIMAX**

DILLIMAX	Soudage manuel à l'arc	Soudage à l'arc sous flux solide	Soudage à l'arc sous protection gazeuse (MAG)	Fabricant
500	FOX EV63	3NiMo1-UP/BB24	NiMo1-IG Union TG 55 Ni	Böhler Th. Schweiß.
	—	Topcore 740B/ST55,ST65 Topcore 741B/ST55,ST65	Megafil 740B, 741B, 821B /M21, CO2	Drahtzug Stein
	OK 74.78	OK13.39/ OK Flux 10.61	OK Tubrod 15.06	ESAB
	Tenacito 70	OE-S3NiMo1-OP121TT Fluxocord 41-OP121TT	Carbofil NiMo1 Fluxofil 41	Oerlikon
	Phoenix SH schwarz K	Union S4Mo/UV421TT Union S2 NiMo1/UV421TT	Union K5 Ni	Thyssen Schweiß.
550	FOX EV65/70/70Mo	3NiMo1-UP/BB24		Böhler Th. Schweiß.
	—	Topcore 741B/ST55,ST65	Megafil 940M / M21 Megafil 741 / M21, CO2	Drahtzug Stein
	Tenacito 65R	OE-S3NiMo1-OP121TT Fluxocord 41-OP121TT	Carbofil NiMo1 Fluxofil 41	Oerlikon
	Phoenix SH Ni2 K90	Union S3 NiMo/UV421TT Union S3 NiMo1/UV421TT	Union MoNi	Thyssen Schweiß.
690	FOX EV 85	3NiCrMo2.5-UP/BB24	NiCrMo2.5-IG, X70-IG, NiMoCr-IG Union MV NiMoCr	Böhler Th. Schweiß.
	—	Topcore 742B/ST55	Megafil 742M / M21	Drahtzug Stein
	OK 75.75, OK 75.78	OK Autrod13.44/OK Flux10.62	OK Autrod 13.31	ESAB
	Tenacito 75 Tenacito 80	OE-SD3 2,5NiCrMo/OP121TTW Fluxocord 42/OP121TTW	Carbofil NiMoCr Fluxofil 42 / M42	Oerlikon
	Phoenix SH Ni2 100	UnionS3NiMoCr/UV421TT	Union NiMoCr Union X90	Thyssen Schweiß.
890	FOX EV 100	—	X90-IG	Böhler Schweiß.
	—	Topcore 745B/ST55	Megafil 1100M / M21	Drahtzug Stein
	OK 75.78	—	OK Autrod 13.31	ESAB
	Tenacito 100	—	Fluxofil 45	Oerlikon
	Phoenix SH Ni2 130	—	Union X90 Union X96	Thyssen Schweiß.
965	—	—	Megafil 1100M / M21	Drahtzug Stein
	Tenacito 140 = Tenax140	—		Oerlikon
	—	—	Union X96	Thyssen Schweiß.

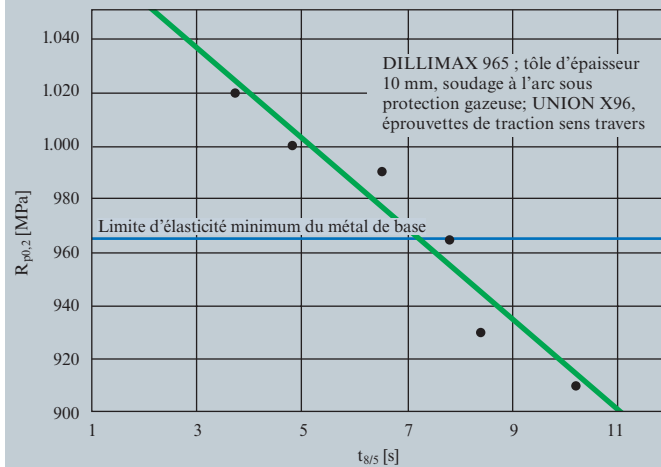


### Energie de soudage et cycles thermiques lors du soudage :

Pour caractériser les cycles thermiques ayant lieu lors du soudage, on choisit en général le temps de refroidissement d'un cordon de soudure pour passer de 800 à 500 °C, temps appelé  $t_{8/5}$ . Ce temps dépend en premier lieu de l'énergie de soudage, de la température de préchauffage et/ou de la température interpassage et, notamment pour les tôles minces, de l'épaisseur de la tôle et de la configuration de la soudure. Le temps  $t_{8/5}$  doit être calculé selon la norme EN 1011.

Afin que les sollicitations thermiques lors du soudage ne provoquent pas de dégradation des caractéristiques de l'acier au-delà des limites autorisées, il est indispensable de fixer une limite supérieure à ne pas dépasser pour le temps de refroidissement et donc en particulier pour l'énergie de soudage. La figure 11 montre l'impact d'un temps  $t_{8/5}$  croissant sur la limite

**Figure 11 :** Influence du temps  $t_{8/5}$  sur la limite d'élasticité du métal déposé dans le cas de DILLIMAX 965



d'élasticité ( $R_{p0,2}$ ) du métal déposé. Il est également nécessaire de fixer un seuil inférieur pour le temps  $t_{8/5}$ , car un refroidissement trop rapide peut entraîner un durcissement excessif de la zone affectée thermiquement. Par ailleurs, l'effusion d'hydrogène est entravée, ce qui peut favoriser la formation de fissures à froid induites par l'hy-

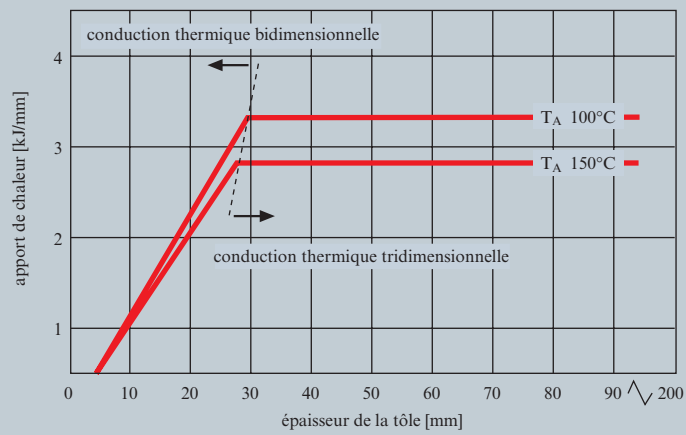
drogène dans le métal déposé et la zone affectée thermiquement (cf. chapitre "Comment éviter les fissures à froid", p. 28).

Les figures 12 à 14 donnent des recommandations pour le choix des temps  $t_{8/5}$  appropriés et de l'apport thermique maximal autorisé pour le soudage de DILLIMAX 690 à 1100.

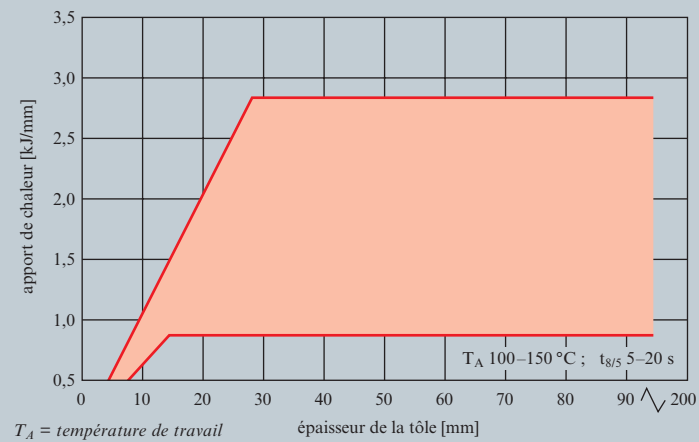


**Figure 12 : DILLIMAX 690 : apport de chaleur lors du soudage en fonction de l'épaisseur de la tôle**

**(a) apport de chaleur maximum autorisé pour  $t_{8/5} < 20$  s**



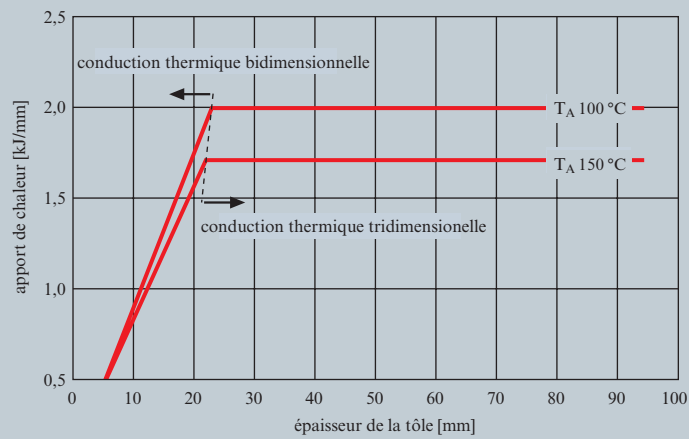
**(b) domaine de travail recommandé**



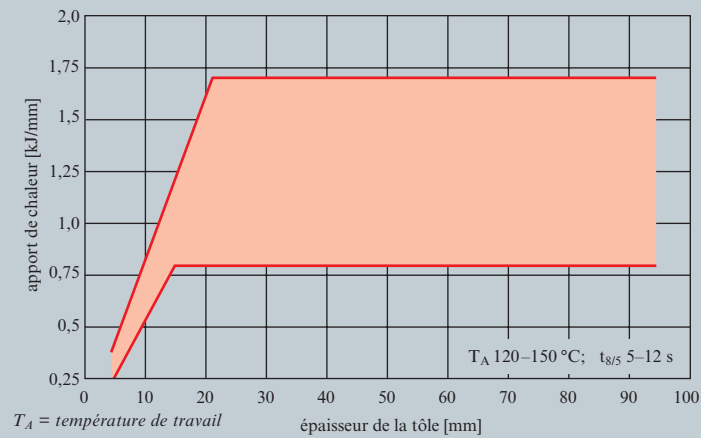


**Figure 13 : DILLIMAX 890 : apport de chaleur lors du soudage en fonction de l'épaisseur de la tôle**

**(a) apport de chaleur maximum autorisé pour  $t_{8/5} < 12$  s**



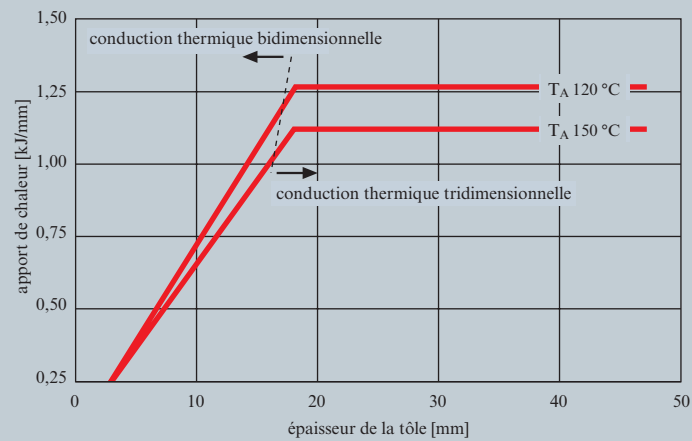
**(b) domaine de travail recommandé**



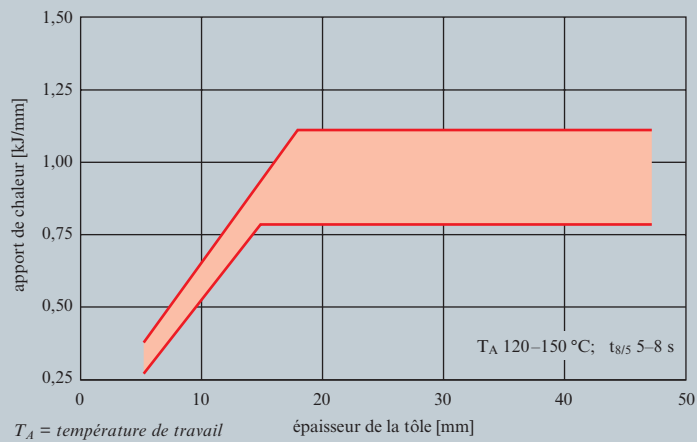


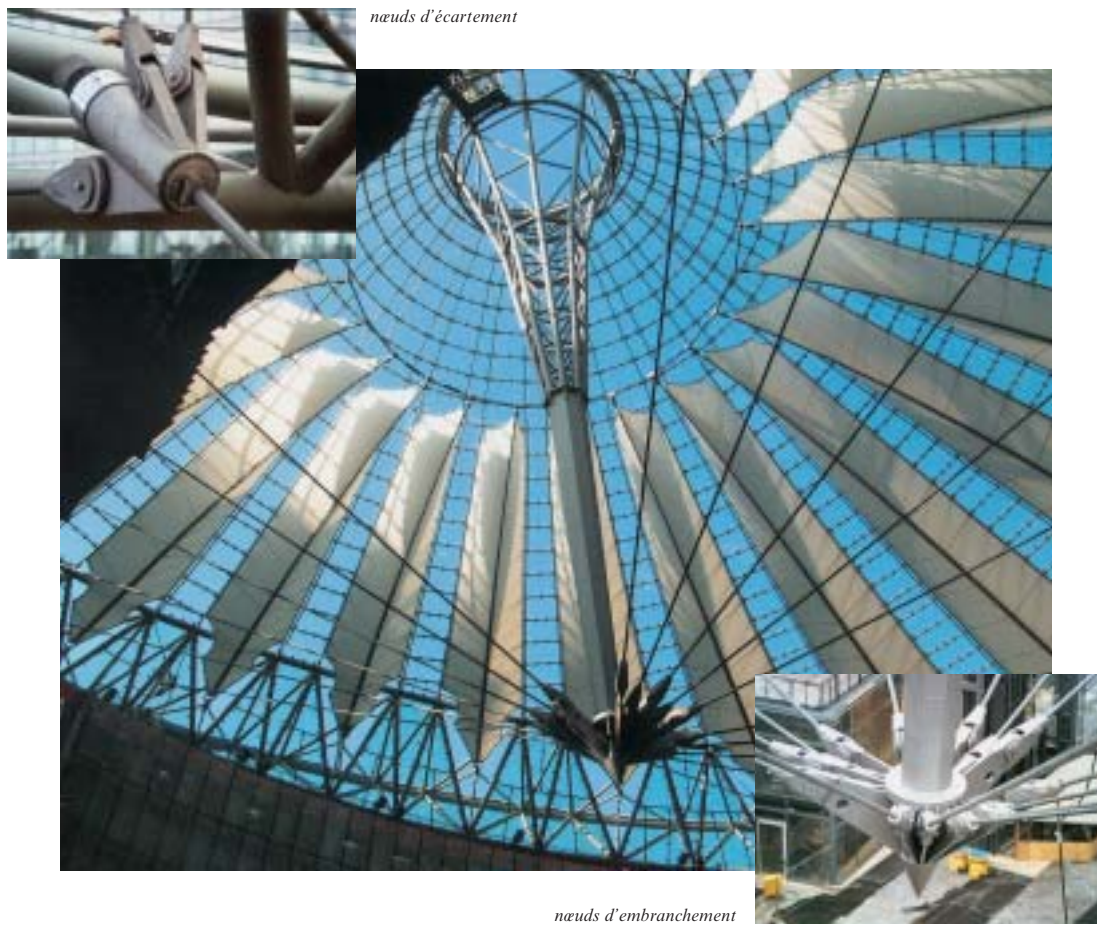
**Figure 14 : DILLIMAX 965/1100 : apport de chaleur lors du soudage en fonction de l'épaisseur de la tôle**

**(a) apport de chaleur maximum autorisé pour  $t_{8/5} < 8$  s**



**(b) domaine de travail recommandé**





**Figure 15 :** Charpente du Sony-Center à Berlin. Les attaches de la poutre circulaire, des nœuds d'écartement et des nœuds d'embranchement ont été réalisés en DILLIMAX 690 (photo publiée avec l'aimable autorisation de Waagner-Biró AG, Vienne, Autriche)



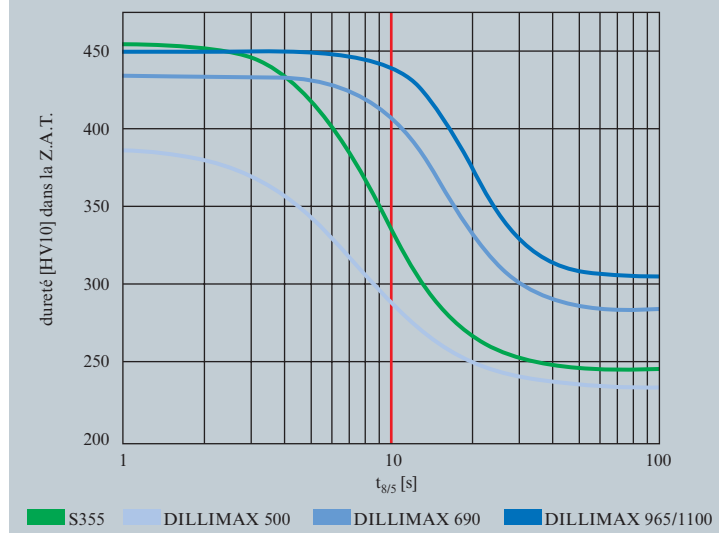
### Comment éviter les fissures à froid :

Comme tous les aciers de construction HLE à grain fin trempés et revenus, les aciers DILLIMAX sont sujets, si les conditions sont défavorables, à la fissuration à froid au voisinage du cordon de soudure.

Ce phénomène est dangereux, car ces fissures peuvent apparaître jusqu'à 48 heures après le soudage. Il convient donc d'en tenir compte lors du contrôle des fissures.

On peut en principe éviter la formation de fissures à froid en prenant des précautions appropriées pendant le soudage et avant tout en éliminant les deux facteurs qui favorisent la fissuration à froid : la présence d'hydrogène dans le métal déposé et les contraintes résiduelles. Un troisième facteur influent, à savoir la dureté due à la trempe

**Figure 16 :** Dureté après refroidissement dans la zone affectée thermiquement pour différents aciers DILLIMAX par rapport à l'acier conventionnel S355, et avec différents temps  $t_{8/5}$



dans la zone affectée thermiquement des aciers DILLIMAX, est difficile à corriger en raison de la teneur relativement élevée en éléments d'alliage du métal de base et des métaux d'apport.

La figure 16 présente des profils de dureté typiques de la zone affectée thermiquement des aciers DILLIMAX avec différents temps  $t_{8/5}$ .



Le dépôt d'hydrogène moléculaire aux joints de grains de la structure du métal déposé et le long de la ligne de fusion est en majeure partie responsable de la fissuration à froid. L'apport d'hydrogène se fait par le biais de métaux d'apport humides, de films d'humidité sur les chanfreins de soudure ou de l'atmosphère entourant l'arc. On peut éviter ce phénomène en choisissant des métaux d'apport appropriés et en les stockant à un endroit sec, et surtout en préchauffant la pièce à souder.

Le préchauffage a pour effet de retarder le refroidissement de la pièce après le soudage et donne ainsi à l'hydrogène le temps nécessaire à sa diffusion. Ce processus a lieu principalement à une température comprise entre 300 et 100 °C. Le préchauffage n'est pas seulement un chauffage préalable de la zone de soudure avant le soudage, mais aussi le maintien

d'une température minimale donnée pendant toute la durée du soudage (température de travail). La zone préchauffée doit être large d'au moins 100 millimètres des deux côtés de la soudure.

Les températures de préchauffage recommandées pour DILLI-MAX 690 à 1100 sont indiquées dans les figures 17 à 19.

Pour les tôles d'épaisseur supérieure à 30 mm et si la technique de soudage utilisée entraîne un apport d'hydrogène élevé (par exemple le soudage à l'arc sous flux solide), il est recommandé de procéder à un recuit d'effusion d'hydrogène à 200 °C immédiatement après soudage. La durée de recuit dépend de l'épaisseur de la pièce et doit être d'au moins 2 heures.

Le risque de fissuration dans les joints soudés suite à des contraintes résiduelles est parti-

culièrement élevé lorsque la section de la soudure n'est qu'en partie remplie. C'est pourquoi il faut absolument éviter que la température ne descende au-dessous de la température de travail prescrite, et ce pendant toute la durée du soudage.

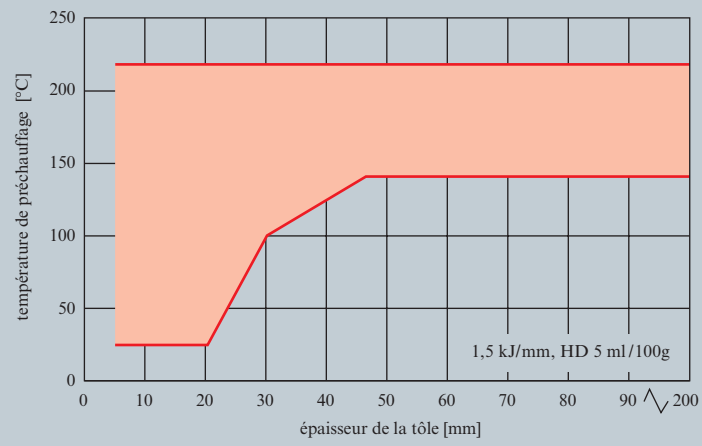
En évitant les transitions de section brusques et l'accumulation des cordons de soudure, on peut réduire les contraintes résiduelles. Veillez par ailleurs à bien ajuster les différentes pièces et à réaliser des cordons de soudure sans entaille. Le choix judicieux des séquences de soudage permet également de réduire les contraintes résiduelles.

En principe, il convient de choisir la séquence de soudage de sorte que les différentes pièces puissent se contracter librement le plus longtemps possible.

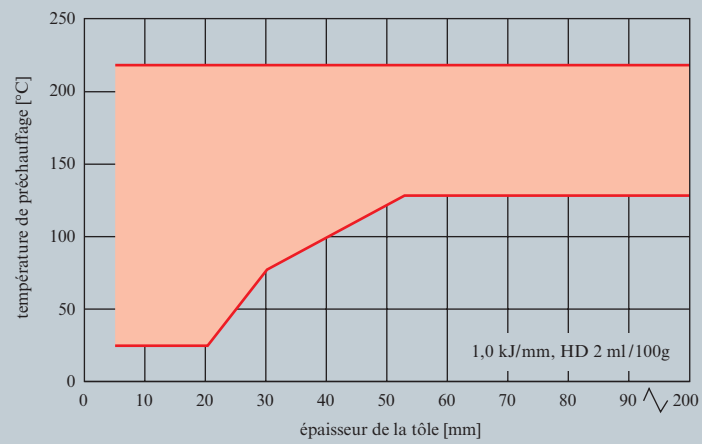


**Figure 17 : DILLIMAX 690 : températures de préchauffage recommandées en fonction de l'épaisseur de la tôle**

**(a) soudage manuel à l'arc**



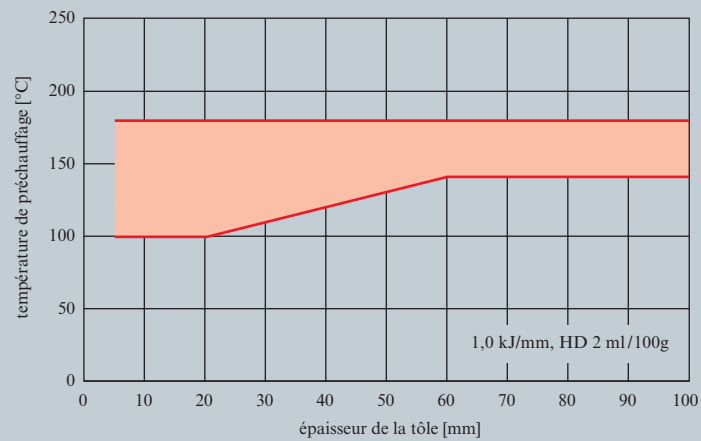
**(b) soudage MAG (sous gaz actif avec électrode métallique)**



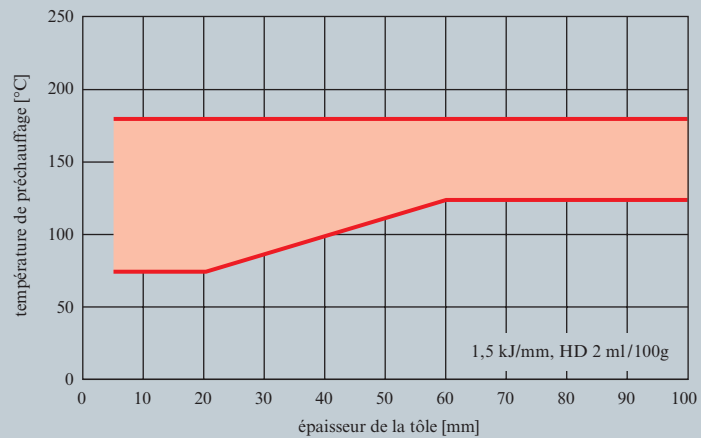


**Figure 18 : DILLIMAX 890 : températures de préchauffage recommandées en fonction de l'épaisseur de la tôle**

**(a) soudage MAG ; soudure bord à bord**



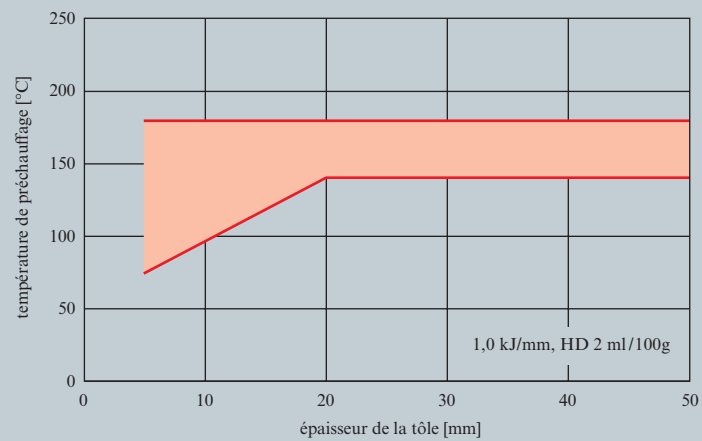
**(b) soudage MAG ; soudure d'angle**



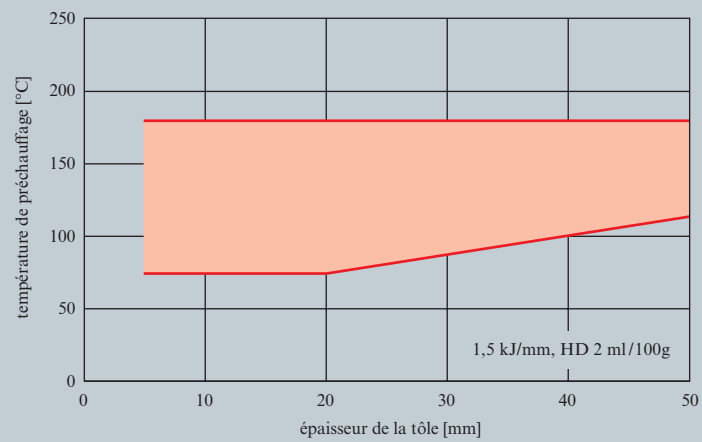


**Figure 19 : DILLIMAX 965/1100 : températures de préchauffage recommandées en fonction de l'épaisseur de la tôle**

**(a) soudage MAG ; soudure bord à bord**



**(b) soudage MAG ; soudure d'angle**





### **Recuit de détensionnement**

La ténacité des aciers DILLIMAX et de leurs joints soudés préparés en adéquation avec le matériau autorise en règle générale leur utilisation pour des éléments de construction fortement sollicités, même en l'absence de recuit de détensionnement.

Si un recuit de détensionnement est nécessaire pour répondre à des prescriptions techniques ou en raison du type de construction, il est recommandé de prendre contact avec DILLINGER HÜTTE GTS.

La température du recuit de détensionnement doit en règle générale rester inférieure d'au moins 40 °C à la température de revenu après la trempe chez le fabricant. Si l'utilisateur prévoit d'effectuer un recuit de détensionnement, il faut demander lors de la commande la mention de la température de revenu effective sur le certificat de livraison de DILLINGER HÜTTE GTS. La durée de maintien du recuit doit être en principe de 60 minutes maximum. Si la durée de maintien prescrite est plus longue, il convient de réduire encore plus la température du recuit de détensionnement par rapport à la température de revenu. Lors de la montée en température, il faut limiter au

maximum le gradient de température dans la tôle, surtout en cas de contraintes résiduelles élevées et de forte épaisseur de tôle.

Lorsque la température de recuit de détensionnement est fixée à l'avance et que l'utilisateur ne peut donc pas se baser sur les températures de revenu indiquées dans le certificat, il convient d'en discuter avec DILLINGER HÜTTE GTS avant la commande.

La composition chimique et le traitement thermique spécifique des aciers DILLIMAX leur confèrent une limite élastique à chaud relativement élevée. Leur détente lors du recuit de détensionnement n'est donc pas aussi complète que pour les aciers de construction conventionnels.

Le recuit de détensionnement n'est pas autorisé dans le cas de DILLIMAX 1100.

### **Chaud de retrait**

La chaude de retrait de tôles est une méthode fréquemment utilisée dans la construction métallique pour mettre en forme des pièces complexes et pour obtenir des sections plates. Tous les aciers DILLIMAX jusqu'à DILLIMAX 965 peuvent subir sans problème une chaude de retrait. Comme pour les aciers conventionnels, il convient ici

aussi de respecter certaines conditions générales, en faisant la distinction entre un apport de chaleur linéaire et un apport de chaleur triangulaire ou ponctuel. La pratique de la chaude de retrait n'est pas autorisée dans le cas de DILLIMAX 1100.

**Chaud de retrait avec apport de chaleur linéaire :** Des essais sur le comportement en service ont montré que la chaude de retrait avec apport de chaleur linéaire jusqu'à 800 °C n'entraînait pas de baisse des caractéristiques de résistance et de résilience pour DILLIMAX 690. Pour les qualités DILLIMAX à limite d'élasticité supérieure, il faut compter avec une baisse de la résistance et de la ténacité si l'apport de chaleur est trop élevé.

**Chaud de retrait avec apport de chaleur triangulaire ou ponctuel :** Contrairement à la chaude linéaire, ce procédé provoque un réchauffement de toute la section de la tôle, d'où un maintien plus long au voisinage de la température maximale (qui est supérieure à la température de revenu) et des temps de refroidissement également plus longs. Pour tous les aciers DILLIMAX jusqu'à DILLIMAX 890, il est recommandé dans ce cas de ne pas dépasser 650 °C (pour DILLIMAX 965 : 600 °C) lors de la chaude de retrait.



### **Galvanisation à chaud**

Les aciers HLE sont sujets à la fissuration lors du décapage ou de la galvanisation à chaud. Cependant, le risque de fissuration lors de la galvanisation à chaud ne dépend pas uniquement du choix du matériau ; il dépend également de la construction, des contraintes résiduelles, de la composition du bain de zinc et du contrôle du processus de galvanisation. Pour cette raison, l'utilisation d'aciers HLE trempés et revenus dans des constructions galvanisées à chaud est à considérer avec une prudence toute particulière. Dans tous les cas, il est recommandé de prendre contact avec le producteur d'acier ou l'atelier de galvanisation.

### **Usinage**

Malgré leur résistance élevée, les aciers DILLIMAX sont faciles à usiner, à condition de respecter quelques règles fondamentales. En premier lieu, il faut éviter toute vibration. Il est donc recommandé de travailler sur une machine la plus rigide possible et de minimiser l'écart entre la pièce à usiner et la machine (bâti). Il est également conseillé de bien serrer la pièce à usiner sur la table.

Suivant le type d'usinage pratiqué, il est également important d'assurer d'un refroidissement suffisant des outils. Une alimentation en réfrigérant discontinu ou insuffisante peut provoquer une surchauffe du tranchant, ce

qui entraîne une usure plus rapide de celui-ci, voire même une rupture de l'outil. Veuillez à cet effet respecter les indications des fabricants d'outils.

Les recommandations des tableaux suivants concernant le choix d'outils et les paramètres d'usinage des aciers DILLIMAX sont des valeurs approximatives qui peuvent donner des résultats différents selon les machines. L'utilisateur doit donc vérifier leur validité sur le terrain. Pour obtenir des informations plus détaillées sur l'usinage et le choix optimal des outils, nous vous conseillons de prendre contact avec les fabricants d'outils ou DILLINGER HÜTTE GTS.



**Perçage :** Les aciers DILLIMAX sont faciles à percer. On peut utiliser pour ce faire des forets hélicoïdaux à coupe rapide au cobalt, des forets hélicoïdaux à mise rapportée en métal dur, des forets hélicoïdaux en alliage dur (éventuellement avec refroidissement intérieur) ainsi que des

forets à plaquettes réversibles. Dans le cas de forets stables, il est recommandé de démarrer le perçage avec une avance plus rapide, afin d'assurer une prise rapide et stable. Ceci permet également de réduire les vibrations. De la même façon, l'interruption de l'avance avant la

sortie du foret permet de relâcher machine et outil et d'éviter ainsi les ruptures de tranchant.

Le tableau 8 donne des indications complémentaires sur le choix des outils et des paramètres de perçage adaptés.

**Tableau 8 :** Valeurs indicatives des paramètres de perçage pour DILLIMAX 690 à 1100

DILLIMAX	Type d'outil (matériau de coupe)	Vitesse de coupe $V_c$ [m/min]	Avance f [mm/U] en fonction du diamètre		
			5 – 15 mm	20 – 30 mm	30 – 40 mm
690	foret hélicoïdal en acier rapide (HSS) allié au cobalt <sup>1)</sup> (TIN, TiCN) <sup>2)</sup>	10 – 15	0,05 – 0,15	0,15 – 0,25	0,20 – 0,25
	foret à plaquettes amovibles <sup>1)</sup>	80 – 100	–	0,10 – 0,12	0,12
890	foret hélicoïdal en métal dur et/ou à mise rapportée <sup>2)</sup>	35 – 50	0,05 – 0,15	0,15 – 0,25	0,20 – 0,25
	foret hélicoïdal en acier rapide (HSS) allié au cobalt <sup>1)</sup>	8 – 12	0,05 – 0,16	0,20 – 0,25	–
	foret à plaquettes amovibles <sup>1)</sup>	70 – 90	–	0,10 – 0,12	0,12
965	foret à coupe rapide en métal dur (TIN) <sup>2)</sup>	35 – 50 sans refroidissement intérieur 40 – 70 avec refroidissement intérieur	0,10 – 0,20	0,15 – 0,25	–
	foret hélicoïdal en acier rapide (HSS) allié au cobalt <sup>1)</sup>	8 – 10	0,05 – 0,16	0,16 – 0,25	–
	foret à plaquettes amovibles <sup>1)</sup>	60 – 80	–	0,10 – 0,12	0,12
1100	foret à coupe rapide en métal dur (TIN) <sup>2)</sup>	35 – 50 sans refroidissement intérieur 40 – 70 avec refroidissement intérieur	0,10 – 0,20	0,18 – 0,25	–
	foret hélicoïdal en acier rapide (HSS) allié au cobalt <sup>1)</sup>	6 – 10	0,05 – 0,16	0,18 – 0,25	–
	foret à plaquettes amovibles <sup>1)</sup>	50 – 70	–	0,10	0,10

<sup>1)</sup> résultats obtenus à l'aide d'outils de la société Ferrotec, Bielefeld, Allemagne

<sup>2)</sup> résultats obtenus à l'aide d'outils de la société Fette GmbH, Schwarzenbek, Allemagne

Agent réfrigérant et/ou lubrifiant: émulsion



**Fraisage conique :** Le fraisage conique et cylindrique des qualités DILLIMAX de limite d'élasticité très élevée est facilité lorsque l'outil est équipé d'un tourillon de guidage, évitant ainsi les vibrations. L'utilisation de forets aléseurs à trois tranchants contribue également à réduire les vibrations. Le tableau 9 donne des valeurs indicatives pour la vitesse de coupe et l'avance.

**Taraudage :** Il est généralement possible de réaliser les filetages à la machine. Le tableau 10 donne des indications concernant le choix des outils, la vitesse de coupe et la vitesse de rotation.

**Sciage :** Nous vous recommandons d'utiliser une scie à ruban pour scier les qualités DILLIMAX de limite d'élasticité très élevée. Il est également préférable de meuler la rive oxycoupée dans la zone de sciage sur une profondeur de 1 à 2 mm et de scier la section la plus petite. En pratique, les rubans de scie au cobalt ou les lames de scie en métal dur donnent de bons résultats. De plus, il faut assurer un refroidissement suffisant.

**Tableau 9 :** Valeurs indicatives des paramètres de fraisage conique pour DILLIMAX 690 à 1100

DILLIMAX	Type d'outil (matériau de coupe)	Vitesse de coupe $V_c$ [m/min]	Avance $f$ [mm/U] en fonction du diamètre	
			15 – 30 mm	30 – 60 mm
690 890 965 1100	foret en métal dur et/ou à mise rapportée <sup>1)</sup>	30 – 40	0,10 – 0,20	0,15 – 0,25

<sup>1)</sup> résultats obtenus à l'aide d'outils des sociétés Fette GmbH, Schwarzenbek, Allemagne et Ferrotec, Bielefeld, Allemagne

Agent réfrigérant et/ou lubrifiant: émulsion

**Tableau 10 :** Valeurs indicatives des paramètres de taraudage pour DILLIMAX 690 à 1100

DILLIMAX	Type d'outil (matériau de coupe)	Vitesse de coupe $V_c$ [m/min]	Vitesse de rotation $n$ [1/min] en fonction du diamètre du filetage				
			M10	M16	M20	M30	M42
690 890 965 1100	Taraud à main ou machine HSS-Co <sup>1)</sup> (HSS, TIN, TICN) <sup>2)</sup>	3 – 8	60 – 120	50 – 100	40 – 80	30 – 60	20 – 50

<sup>1)</sup> résultats obtenus à l'aide d'outils de la société Ferrotec, Bielefeld, Allemagne

<sup>2)</sup> résultats obtenus à l'aide d'outils de la société Fette GmbH, Schwarzenbek, Allemagne

Agent réfrigérant et/ou lubrifiant: émulsion



**Fraisage :** Les aciers DILLIMAX peuvent être usinés à l'aide d'outils en acier à coupe rapide (HSS, TiN, TiCN) et d'outils munis de plaquettes réversibles.

En raison de la dureté des rives oxycoupées, qui peut atteindre des valeurs élevées, il est préférable d'effectuer la première

entaille jusqu'à une profondeur d'au moins 2 mm, c'est-à-dire suffisamment loin de la zone affectée thermiquement. Les plaquettes réversibles en métal dur sont sensibles aux vibrations. Ces dernières doivent donc être réduites par tous les moyens disponibles, par exemple en fixant solidement la pièce à usi-

ner. Si vous souhaitez fraiser de grandes surfaces, nous vous recommandons de procéder à un fraisage alterné sur les deux faces, afin d'éviter la déformation de la pièce à usiner. Le tableau 11 donne des valeurs indicatives de la vitesse de coupe et de l'avance pour le dressage et le chanfreinage.

**Tableau 11 :** Valeurs indicatives des paramètres de fraisage de DILLIMAX 890/965

DILLIMAX	Type d'outil (matériau de coupe)	Vitesse de coupe $V_c$ [m/min]	Avance / dent $f_z$ [mm]
890	fraise à surfacer / fraise dégrossisseuse (FC 220 N) <sup>1)</sup> (HC-P20 + TiN)	130 – 190	0,12 – 0,20
965	fraise à surfacer / fraise dégrossisseuse (FC 220 N) <sup>1)</sup> (HC-P20 + TiN)	120 – 180	0,10 – 0,18

<sup>1)</sup> résultats obtenus à l'aide d'outils de la société Fette GmbH, Schwarzenbek, Allemagne

Agent réfrigérant et/ou lubrifiant: aucun



## PROPRIETES DES ELEMENTS DE CONSTRUCTION EN DILLIMAX

Il s'agit en premier lieu des propriétés de résistance à la fatigue. Les aciers de construction à grain fin soudables qui présentent une résistance très élevée, telles les qualités DILLIMAX 690 à DILLIMAX 1100, sont utilisés de préférence pour des éléments dont le poids doit être réduit à un minimum (par exemple pour les engins de manutention et de levage). Dans le cas d'éléments de construction soumis à des sollicitations cycliques, ces dernières peuvent jouer un rôle décisif dans le dimensionnement. La résistance élevée des aciers DILLIMAX est particulièrement avantageuse pour les constructions calculées en statique en raison du faible nombre de cycles.

Les aciers DILLIMAX possèdent une bonne résistance lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations cycliques. Cependant, les cordons de soudure subissent des sollicitations en fatigue plus critiques que le métal de base, ce qui peut entraîner la défaillance d'un élément de la construction.

Pour pouvoir profiter de la résistance élevée du matériau de base, il importe donc lors de l'utilisation des aciers DILLIMAX de porter une attention particulière à la qualité des soudures et à leur traitement postérieur. Le plus



*Figure 20 : Grue mobile lors du montage d'une grue de chantier  
(photo publiée avec l'aimable autorisation de Liebherr-Werk  
Ehingen GmbH, Ehingen)*



important est de minimiser l'effet d'entaille partant des joints soudés. Le comportement du cordon de soudure dépend en grande partie du facteur de concentration de contraintes résultant de la géométrie de la soudure.

La figure 21 présente des bandes de dispersion Wöhler pour les joints en V en DILLIMAX. La figure montre que l'endurance n'augmente pas dans les mêmes proportions que la limite d'élasticité. Dans des cas extrêmes, par exemple pour un grand nombre de cycles, les aciers de classe de résistance la plus haute (DILLIMAX 890 à 965) sont plus sensibles que les aciers qui possè-

dent une résistance plus faible (DILLIMAX 500 à 690).

Le traitement TIG des joints bord à bord permet d'augmenter la durée de vie grâce à l'amélioration de la géométrie des entailles (transition plus douce entre la surface de la tôle et la passe finale de la soudure) (cf. figure 22).

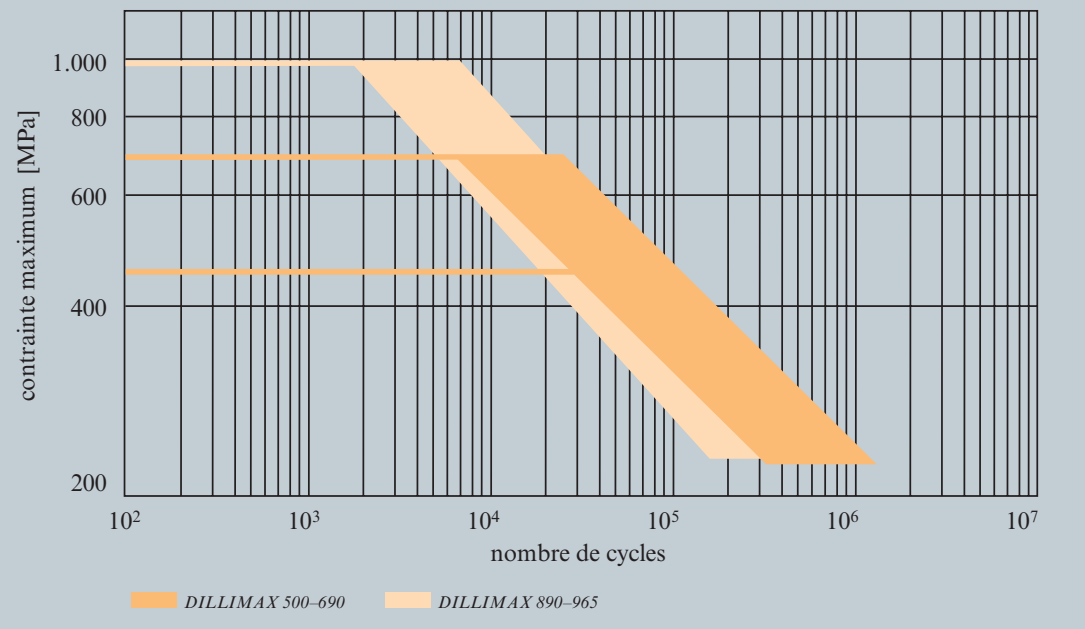
L'application des traitements TIG et UIT (Ultrasonic Impact Treatment) conduit à des améliorations importantes de la résistance à la fatigue des constructions soudées. L'amélioration de la résistance à la fatigue par le procédé UIT résulte

essentiellement de l'apport de contraintes internes de compression ainsi que de l'amélioration de la forme d'entaille au niveau de la transition entre le joint soudé et le métal de base. De très bons résultats ont été obtenus pour DILLIMAX 690 à l'aide de ce procédé, cf. figure 23.

Le tableau 12 montre comment d'autres traitements complémentaires des cordons de soudure permettent d'augmenter sensiblement la durée de vie des éléments de construction. Les valeurs indiquées ont un caractère purement informatif.

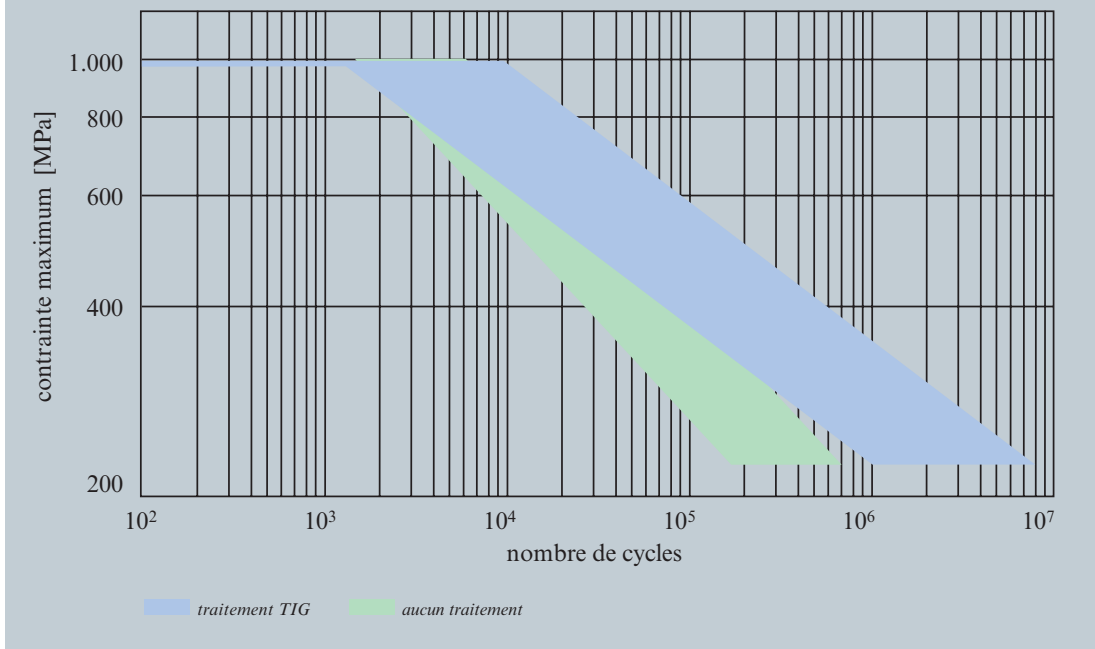


**Figure 21 : Bandes de dispersion Wöhler de joints soudés en DILLIMAX**  
(probabilité de rupture de 10 % à 90 %, joints en V d'angle 60°, épaisseur de la tôle 10 mm, R = 0)



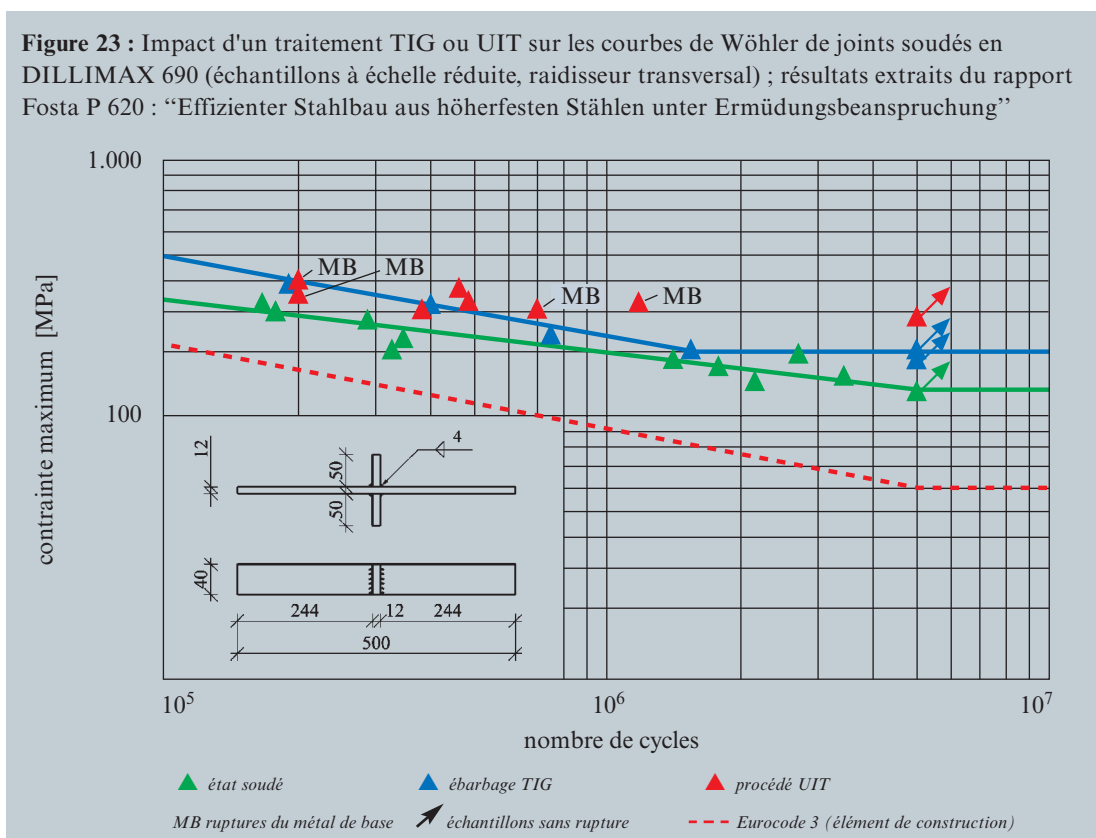


**Figure 22 :** Impact d'un traitement TIG sur les bandes de dispersion Wöhler de joints soudés en DILLIMAX 890/965 (probabilité de rupture de 10 % à 90 %, R = 0)





**Figure 23 :** Impact d'un traitement TIG ou UIT sur les courbes de Wöhler de joints soudés en DILLIMAX 690 (échantillons à échelle réduite, raidisseur transversal) ; résultats extraits du rapport Fosta P 620 : "Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung"





**Tableau 12 :** Contrainte cyclique maximum en MPa pour le métal de base et les joints soudés en DILLIMAX après différents traitements (probabilité de rupture 50 %, valeurs à caractère informatif)

	DILLIMAX 690		DILLIMAX 890		DILLIMAX 965	
	$10^5$	$2 \cdot 10^6$	$10^5$	$2 \cdot 10^6$	$10^5$	$2 \cdot 10^6$
métal de base	560	350	670	410	530	350
joint en V sans traitement	360	180	370	160	330	160
joint en V avec recuit de détensionnement	320	200	270	160	—	—
joint en V avec ébarbage TIG	490	290	470	235	450	210
joint en V avec ébarbage TIG et recuit de détensionnement	460	270	420	245	—	—
joint en V avec grenailage	475	340	400	245	—	—
joint en V avec grenailage et recuit de détensionnement	330	195	—	—	—	—
joint en V avec ébarbage TIG et grenailage	420	300	—	—	—	—



## BIBLIOGRAPHIE

### **Bibliographie relative au chapitre “Allégez vos constructions métalliques”**

Auvigne J.F. : Un exemple industriel d'allègement par l'emploi des HLE : Cas des grues mobiles PPM, Tôles en acier HLE – Choix et mise en œuvre, Journées organisées par le CETIM, l'OTUA et le CNISF, 03/1994, pp. 57-63

Nimal F. : Participation des aciers HLE dans l'allègement des pièces mécaniques creuses faites à partir de tôles – Bilan économique, Tôles en acier HLE – Choix et mise en œuvre, Journées organisées par le CETIM, l'OTUA et le CNISF, 03/1994, pp. 65-75

EN 10025-6 (11/2004): Produits laminés à chaud en aciers de construction – Partie 6 : Conditions techniques de livraison pour produits plats en aciers à haute limite d'élasticité à l'état trempé et revenu, CEN

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (autorisation générale de la surveillance des chantiers) Nr. Z-30.1-1: Flacherzeugnisse aus hochfestem schweißgeeignetem Feinkornbaustahl S690QL1 und die daraus hergestellten Bauteile. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Januar 2005

prEN 1993-1-12: 2005

Eurocode 3: Calcul des structures en acier – Partie 1.12 : Règles additionnelles pour l'utilisation de l'EN 1993 jusqu'à la nuance d'acier S700, CEN, 2005

EN 10028-6 (06/2003): Produits plats en aciers pour appareils à pression – Partie 6 : Aciers soudables à grains fins, trempés et revenus, CEN

### **Bibliographie relative au chapitre “Mise en œuvre de DILLIMAX”**

Bouhelier C.: Le formage des tôles fortes, CETIM, 1982

Uwer D. et al : Schweißen moderner hochfester Baustähle (soudage des aciers de construction HLE modernes), Stahl u. Eisen 112 (1992) 4, pp. 29-35

EN 1011 (Partie 1: 05/2002, Partie 2 : 01/2001) : Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques, CEN

Thiele W.-R. : Gefüge von hochfesten Feinkornbaustählen nach Flammrichtvorgängen (microstructure des aciers de construction HLE à grain fin après chaude de retrait). Linde AG Sonderdruck 114. Linde AG Werksgruppe Technische Gase, Höllriegelskreuth



Osama A.K. : Flammrichten von schweißgeeigneten Vergütungsstählen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt (chaude de retrait d'aciers trempés et revenus soudables à faible teneur en carbone), *Schweißen und Schneiden* 35 (1983) 5, pp. 216-219

Nieß M. et al. : Auswirkungen des Flammrichtens auf die mechanischen Güterwerte von hochfesten Feinkornbaustählen (effets de la chaude de retrait sur les caractéristiques mécaniques des aciers de construction HLE à grain fin). *DVS-Berichte Band 112*. DVS-Verlag, Düsseldorf, 1988

Beratung Feuerverzinken : Arbeitsblätter "Feuerverzinken" (fiches « galvanisation à chaud »). Institut Feuerverzinken GmbH, Düsseldorf, 1996

#### **Bibliographie relative au chapitre "Propriétés des éléments de construction en DILLIMAX"**

Ring M. et al. : Fatigue properties of laser-beam weldments on high-strength steels (tenue en fatigue de cordons soudés au laser en acier HLE), *Steel Research* 65 (1994) 11, pp. 505-510

Fischer F. et al. : Risseinleitungs- und Rissausbreitungswiderstand hochfester Baustähle bei statischer Beanspruchung (résistance à l'amorçage et à la propagation de fissures sur les aciers de construction HLE soumis à des sollicitations statiques), *Stahl und Eisen* 114 (1994) 11, pp. 125-128

Hübner P. et al. : MAG-Schweißverbindungen des Stahls StE 885 bei statischer, dynamischer und zyklischer Beanspruchung (joints soudés MAG de l'acier StE 885 sous sollicitation statique, dynamique et cyclique), *Stahl und Eisen* 115 (1995) 7, pp. 81-86

Hübner, P. : Schwingfestigkeit der hochfesten schweißbaren Baustähle StE 885 und StE 960 (résistance aux efforts alternés des aciers de construction StE 885 et StE 960). Dissertation. Technische Universität Freiberg, 1996

Franke S. et al. : Einfluss von Strukturparametern auf statische und zyklische Bruchzähigkeitskennwerte (impact des paramètres structurels sur les valeurs de la ténacité à la rupture statique et cyclique). Bericht EUR 16782 DE. Technische Forschung Stahl, 1994.

U. Kuhlmann, A. Dürr, J. Bergmann, R. Thumser : Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung (amélioration de la résistance à la fatigue des assemblages soudés en aciers HLE). Forschungsvorhaben P 620. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2006



---

## GLOSSAIRE

Allongement à la rupture .....	8 et suivante
Carbone équivalent.....	6
Chaud de retrait .....	33
Composition chimique .....	6
Contraintes résiduelles .....	28 et suivante, 37
Fissuration à froid .....	23, 28 et suivante
Formage à chaud .....	16 et suivante
Formage à froid .....	12 et suivantes
Fraisage .....	37
Fraisage conique.....	36
Galvanisation .....	34
Laser, découpage .....	20
Limite d'élasticité .....	8
Métaux d'apport de soudage.....	21 et suivante
Nouvelle trempe .....	16 et suivante
Ouverture de matrice .....	12 et suivantes
Oxycoupage, découpage autogène.....	17 et suivantes
Perçage .....	36
Plasma, découpage .....	20
Préchauffage, température minimum de .....	18, 30 et suivantes
Rayon de pliage .....	12 et suivantes
Recuit de détensionnement .....	16 et suivante, 33
Résilience .....	9, 15
Résistance à haute température.....	11
Résistance à la fatigue (endurance) .....	38 et suivantes
Résistance à la traction .....	8 et suivante
Revenu.....	7, 16 et suivante
Sciage .....	36
Sens de l'épaisseur, caractéristiques dans le .....	11
Soudabilité .....	21 et suivantes
Soudage à l'arc sous flux solide.....	21 et suivante
Soudage à l'arc sous protection gazeuse .....	21, 30 et suivantes
Soudage manuel à l'arc .....	21, 30 et suivantes
Taroudage.....	36
Temps de refroidissement .....	23 et suivantes
Trempe à l'eau et revenu .....	7
Vieillessement.....	15 et suivantes
Zone affectée thermiquement.....	17 et suivante, 20



---

## SOCIETES DE VENTE

### **Allemagne**

Vertriebsgesellschaft  
Dillinger Hütte GTS  
Postfach 104927  
70043 Stuttgart  
Tél: +49 7 11 61 46-300  
Fax: +49 7 11 61 46-221

### **France**

Dilling-GTS Ventes  
5, rue Luigi Cherubini  
93212 La Plaine Saint Denis  
Cedex  
Tél: +33 1 71 92 16 74  
Fax: +33 1 71 92 17 98

Pour obtenir les coordonnées de  
notre réseau commercial dans  
les autres pays, nous vous prions  
de vous adresser à notre bureau  
de coordination à Dillingen.  
Tél: +49 68 31 47 23 85  
Fax: +49 68 31 47 99 24 72

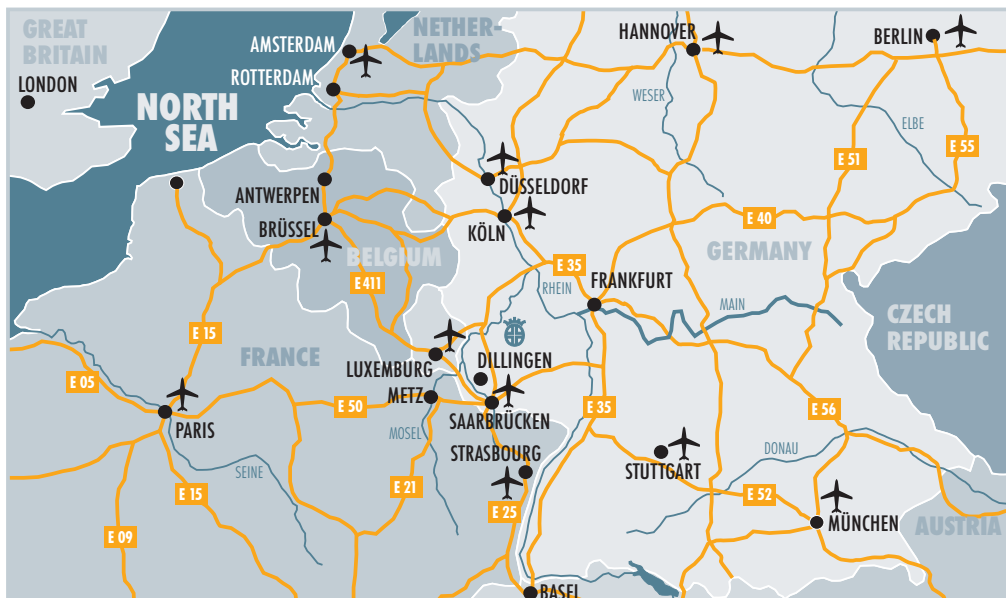


### AG der Dillinger Hüttenwerke

Postfach 1580  
66748 Dillingen/Saar  
Tél: +49 68 31 47-21 46  
Fax: +49 68 31 47-30 89

e-mail: [info@dillinger.biz](mailto:info@dillinger.biz)  
<http://www.dillinger.de>

Remarque générale (responsabilité) :  
Les indications relatives à la qualité  
et aux possibilités d'utilisation de  
matériaux et/ou de produits sont  
de nature purement descriptive.  
Les garanties sur la présence de  
caractéristiques ou l'aptitude pour  
une application donnée font tou-  
jours l'objet d'un accord écrit  
spécifique.



Comment nous trouver



