

**Ministère de l'Éducation Nationale, de
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**

STRUCTURES METALLIQUES



*Réseau
national
de ressources*



DOSSIER

Professeur

Métallurgie

du soudage

1^{ère} année BTS

BTS

Conception

Réalisation

Chaudronnerie

Industrielle

AVANT PROPOS

Les évolutions des technologies, des contenus de formation et des pratiques pédagogiques nécessitent une adaptation constante des connaissances des enseignants.

La formation continue des professeurs qui en découle est organisée essentiellement autour des services académiques de formation des personnels.

Le réseau national de ressources STRUCTURES MÉTALLIQUES, sous l'autorité de la Direction de l'Enseignement Scolaire et de l'Inspection Générale développe une politique de ressources pour la formation continue des enseignants.

Au travers des différents dossiers et fascicules élaborés par des professeurs du «terrain», le réseau permet de soutenir et d'accompagner cette formation, c'est-à-dire :

- ❑ Favoriser l'auto-formation des enseignants, à leur rythme, selon leurs besoins et sur leur lieu de travail ;
- ❑ Proposer des réponses aux besoins et aux problèmes posés;
- ❑ Apporter des informations aux corps d'inspection qui sont les relais avec le «terrain»;
- ❑ Elaborer des supports de formation pouvant être utilisés par les inspecteurs et les services académiques de formation.

C'est dans cette optique que vous est proposé le dossier ressource :

Cours et applications concernant la métallurgie du soudage en BTS CRCI première année.

Ce dossier devrait permettre au technicien supérieur C.R.C.I d'aborder les problèmes de métallurgie du soudage avec un apport de connaissances, une démarche et des outils qui vont lui permettre de solutionner les hétérogénéités dans les différentes zones concernées. Il aura une

connaissance sur la trempabilité des aciers dans un premier temps. L'explication du phénomène (pouvoir trempant) ainsi que les inconvénients s'y rapportant.

Il abordera alors les méthodes basées sur le carbone équivalent ou sur la vitesse de refroidissement de la soudure afin de développer une remédiation.

Viendra enfin l'étude de la fissuration pour les aciers au carbone.

Ce cours est illustré d'études de cas qui permettront de bien assimiler les problématiques rencontrées en métallurgie du soudage.

Les étudiants devraient comprendre les risques encourus lors du soudage et rentrer dans le process qui doit leur permettre d'obtenir les pièces les plus homogènes possibles tant au niveau de la structure qu'au niveau des caractéristiques mécaniques.

Ce dossier a été élaboré par :

M. Marc BENTI professeur au LEGT Paul Constans - 03100 MONTLUCON

Coordination du réseau de ressources
M. Jean Claude TÊTOT
Professeur UPEC - IUFM – SSTP

Centre National de Ressources Structures Métalliques

Place du 8 Mai 45 - BP 85 - 93203 St Denis

Téléphone 01.49.71.87.00 - Fax : 01 49 71 88 39

Site web: <http://cnrsm.creteil.iufm.fr>

METALLURGIE

CRCI PARTIE 1

1 - LE MATERIAU METALLIQUE

Cours : structure du matériau, de l'atome au grain, avec quelques questions.

2 - LES ALLIAGES BINAIRES

Cours : diagramme de transformation simple avec explication de la règle des segments inverses (la démonstration des équations n'est pas obligatoirement donnée aux étudiants). Deux applications en fin de cours.

3 - DIAGRAMME FER CEMENTITE

Cours : comprendre les différentes phases de l'acier, les transformations solides, entrée en matière pour les traitements thermiques.

Application : quelques questions pour bien comprendre le diagramme.

4 - SOUDABILITE DES ACIERS NON ALLIES ET FAIBLEMENT ALLIES

Cours : La soudabilité et le taux de carbone. Comprendre ce qu'est un pouvoir trempant, utilisation du carbone équivalent. Entrée en matière pour les méthodes de résolution.

5 - LES METHODES BWRA ET SEFERIAN

Cours : Utilisation des deux méthodes basées sur le Ceq. Petites applications pour bien assimiler les méthodes.

Application : un exercice de style pour utiliser les deux méthodes.

6 - ENERGIE DE SOUDAGE – VITESSE DE REFROIDISSEMENT – TRCS

Les méthodes IRSID et BAUS ET CHAPEAU

Cours : On aborde ici les courbes et les vitesses de refroidissement. Application : un exercice de style pour utiliser les deux méthodes.

7 - LA FISSURATION

Cours : Différences entre la fissuration à chaud et la fissuration à froid avec leurs causes principales.

Application : Encore un exercice de style pour aller au bout du pré et post-chauffage.

Les cours et exercices sont tirés de livres et de cours de collègues, ils ont été élaborés depuis plusieurs années et mis en commun avec Bordeaux et Le Creusot.

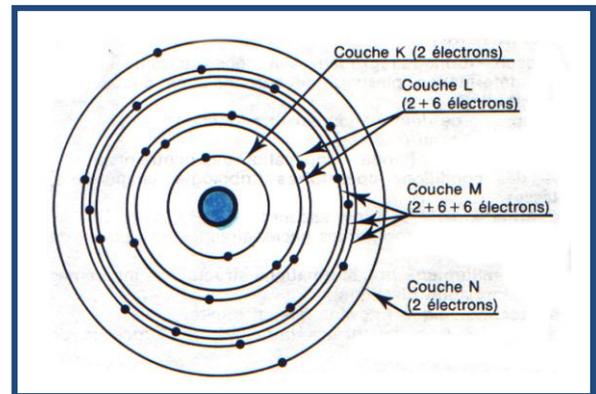
1. LE MATERIAU METALLIQUE

ETAT METALLIQUE :

Un matériau métallique est constitué d'une multitude de grains ($5\mu < \varnothing < 20\mu$).
L'atome est formé d'un noyau et d'un nuage d'électrons ; le noyau comprend les neutrons et les protons.
La maille est un motif d'ions (atomes chargés électriquement).

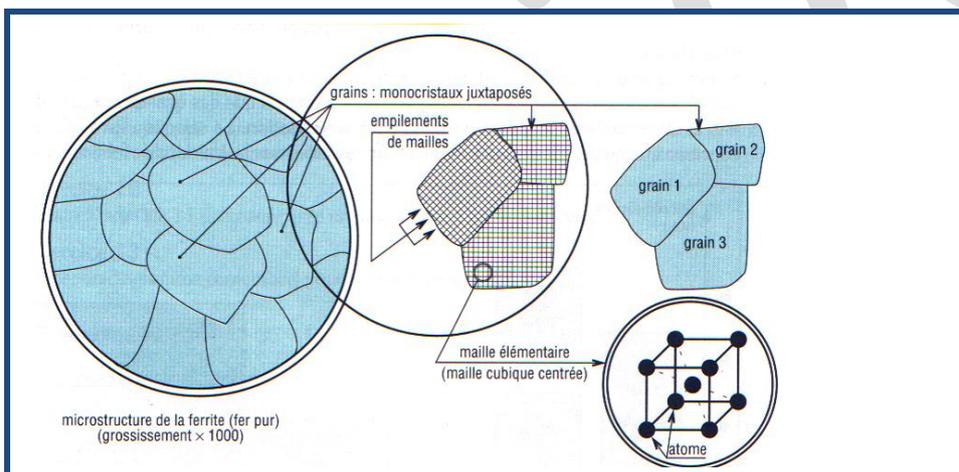
L'ensemble des mailles de même orientation constitue le grain

Atome de Fer

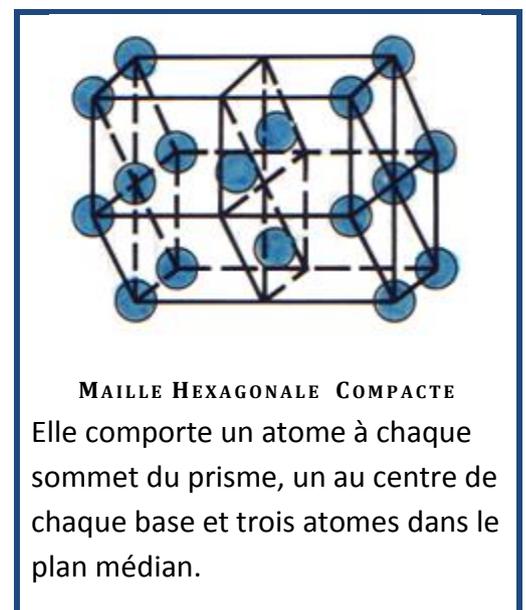
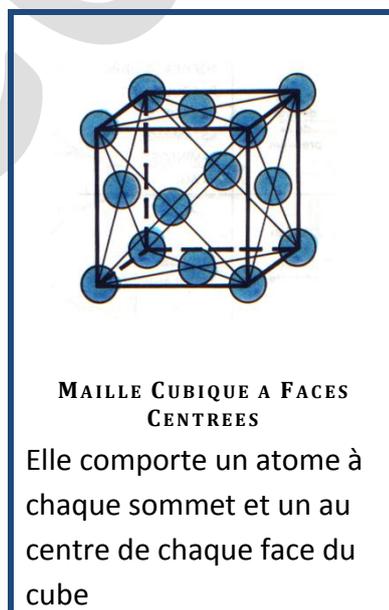
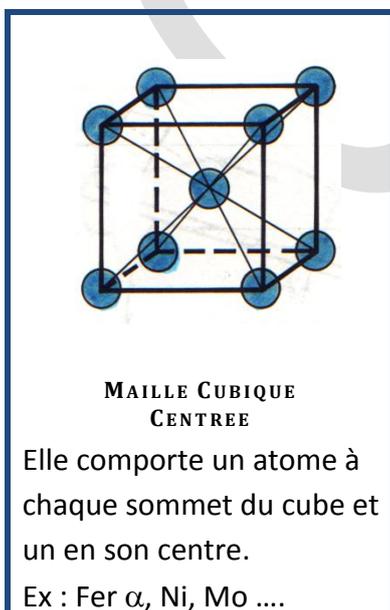


STRUCTURE CRISTALLINE :

Les métaux sont formés de grains dont la forme est polygonale. Cette structure cristalline est à l'origine de leurs propriétés.



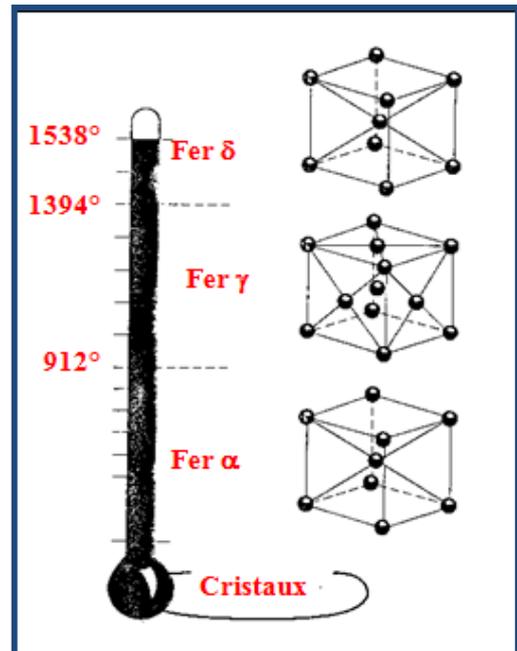
Les métaux cristallisent suivant les systèmes cristallins ci après :



Dans les différentes configurations de mailles nous ne retiendrons que les **systèmes cubiques** (CC; CFC) qui sont ceux des métaux les plus usuels.

Certains métaux, comme le **Fer** n'ont pas toujours le même système cristallin (transformations allotropiques).

Différentes formes mais pas toujours les mêmes propriétés (Carbone : diamant et charbon ; ou Fer + Carbone : trempe ou recuit).



3- NOMBRE D'ATOMES PAR MAILLE:

Une maille CC comporte 8 atomes partagés entre les 8 mailles voisines. $1/8$ pour les sommets plus celui du centre, ce qui nous donne 2 atomes par maille.

Combien une maille CFC comporte-t-elle d'atomes par maille?

2 fois plus, soit 4 atomes (sommets $8 \times 1/8$ + milieu des faces $6 \times 1/2$)

4- ALLIAGE METALLIQUE :

4.1 Caractérisation

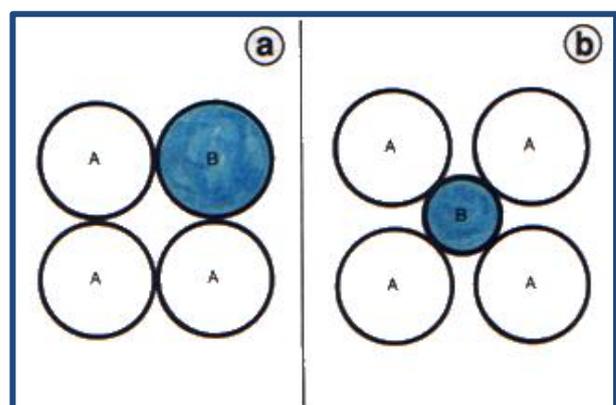
L'alliage métallique est caractérisé par les facteurs suivants :

- Composition chimique : proportion respective des éléments de base
- Constitution physico-chimique : proportion des constituants obtenus à partir des éléments de base (Martensite, Perlite ...).
- Structure : géométrie suivant laquelle sont disposés les constituants (gros grain ou grains fins).
- Etat mécanique : Contraintes résiduelles et propriétés mécaniques.

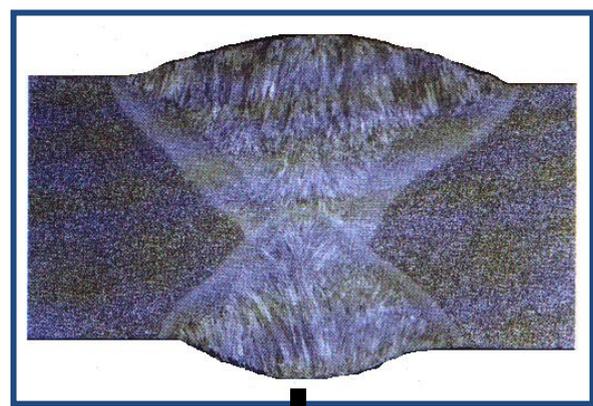
4.2 Différents types

On distingue deux types d'alliage :

- Solution solide de substitution (fig. a)
- **un atome de l'un des constituants se substitue à un atome du réseau principal.**
- Solution solide d'insertion (fig. b)
- **atomes de l'un des constituants s'introduisent dans le vide du réseau principal (Ex : le fer + carbone).**

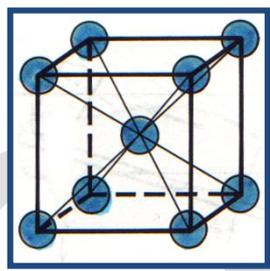


2. ORGANISATION AU SEIN DE LA MATIERE POUR L'ACIER :



ZAT

Métal de Base



La macrographie, examen à l'œil nu ou à la loupe, où l'on observe la structure d'ensemble.

1mm

La micrographie, examen au microscope optique, où l'on observe la structure micrographique. Grossissement $\cong 250$

Zone 5 : Ferrite aciculaire (fer α)

Zone 1 : Ferrite + Perlite

0.001 mm ; $1\mu = 1.10^{-3}$ mm

Structure cristalline, examen au microscope électronique ou ionique.

0.000 000 1 mm

$1 \text{ O} = 1.10^{-7}$ mm

1 - TRAVAIL DEMANDE :

A – Indiquer, par écrit les trois échelles des structures des métaux et alliages.

La macrographie (mm), la micrographie(1 μ), l'atome(1 O).

B – Quel est le but de la macrographie ?

Elle sert à révéler les trois zones d'une soudure : MB, ZF, ZAT.

C – Quel est le but de la micrographie ?

Elle sert à observer le grain et la composition du métal.

D – Quelles sont les structures métalliques les plus répandues ?

Structures CC et CFC.

E – Quels sont les deux types d'alliage que l'on distingue ?

Solution solide d'insertion et de substitution.

LES ALLIAGES BINAIRES

DIAGRAMME A SOLUTION SOLIDE UNIQUE:

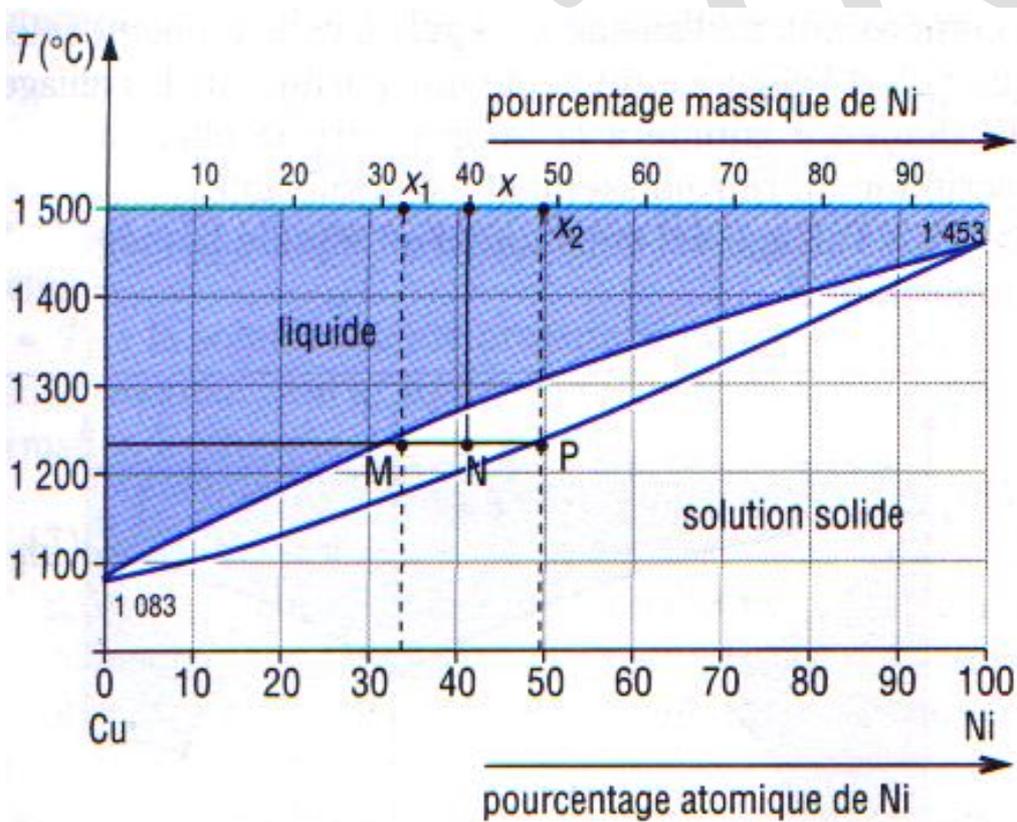
Soit un alliage binaire : deux éléments (exemple du cuivre et du nickel).

Le cuivre et le nickel sont des corps purs, ils changent d'état (liquide, solide) à une seule température.

Un alliage à 40% de nickel commence à se solidifier à 1280°, il est donc pratiquement totalement liquide.

Cet alliage termine sa solidification à 1200°, où il est totalement solide. Entre ces deux températures c'est un mélange de liquide et de solide. Les proportions sont déterminées par la règle des segments inverses.

Nous travaillerons toujours avec le pourcentage massique.



REGLE DES SEGMENTS INVERSES:

Règle des segments inverses : on prend le segment inverse à ce que l'on calcule :

$$\% \text{ calculé} = (\text{Segment inverse} / \text{segment total}) \times 100$$

$$\% \text{Liquide} = (PN/PM) \times 100 \quad \text{et} \quad \% \text{Solide} = (NM/PM) \times 100$$

A température T, l'alliage particulier dont la teneur de Ni est X est caractérisé par une composition particulière (mélange de solide et de liquide). Si m_1 , m_2 et m sont les masses respectives de liquide, de solide et de l'alliage, nous avons:

$$\text{Equation 1} \quad m_1 + m_2 = m$$

$$\text{Equation 2} \quad m_1 X_1/100 + m_2 X_2/100 = m X/100$$

D'où:

$$\text{Le liquide} \quad m_1 / m = PN / PM$$

$$\text{Le solide} \quad m_2 / m = NM / PM$$

$$\text{Equ 1} \quad m_2 = m - m_1 \quad \text{et} \quad \text{Equ2} \quad m_1 X_1 + m_2 X_2 = m X$$

$$\text{On remplace } m_2 \text{ par sa valeur :} \quad m_1 X_1 + (m - m_1) X_2 = m X$$

$$m_1 X_1 + m X_2 - m_1 X_2 = m X \quad \text{d'où} \quad m_1 X_1 - m_1 X_2 = m X - m X_2$$

$$m_1 (X_1 - X_2) = m (X - X_2) \quad \text{d'où} \quad m_1/m (X_1 - X_2) = (X - X_2)$$

$$m_1/m = (X - X_2) / (X_1 - X_2) \quad \text{d'où} \quad m_1/m = PN / PM$$

Application:

- A 1250°, l'alliage cuivre nickel à 40% de nickel en masse contient:

Règle des segments inverses : Liquide segment PN

$$\text{Liquide} = (PN / PM) \times 100 = 60 \%$$

Nous avons : 60 % de liquide à 33% de nickel

40 % de solide à 51% de nickel

- A 1200°, l'alliage cuivre nickel à 30% de nickel en masse contient:

Règle des segments inverses : Liquide segment PN

$$\text{Liquide} = (PN / PM) \times 100 = 60 \%$$

Nous avons : 60 % de liquide à 33% de nickel

40 % de solide à 51% de nickel

DIAGRAMME FER-CEMENTITE

1. CHANGEMENT D'ETAT

La caractéristique particulière du fer est son polymorphisme (plusieurs formes) en fonction de la température et de la pression.

Le fer existe sous trois formes (sans pression extérieure) :

De 0 kelvin (-273° C°) à 912° C : **Système CC, fer α (ferrite).**

De 912° C à 1394° C : **Système CFC, fer γ (austénite).**

De 1394° C à 1538° C : **Système CC, fer δ .**

2. CHANGEMENT DE PHASE.

Les diagrammes d'alliages fer carbone sont de 2 types :

Le diagramme d'équilibre stable **fer graphite.**

Le diagramme d'équilibre métastable **fer cémentite.**

Pour les aciers et dans les conditions de refroidissement industriel, le diagramme métastable est prépondérant.

Le diagramme sera donc limité sur la partie droite, par l'existence d'un composé chimiquement défini de fer et de carbone : **La cémentite.**

3. LES CONSTITUANTS A L'EQUILIBRE DES ALLIAGES FE-C

Dans l'étude qui suit, nous nous attarderons sur les aciers dont la teneur en carbone est inférieure à 2.11 %.

3.1 LA PHASE FERRITIQUE (FER α)

Domaine d'existence : **0° K à 912° C.**

Dissolution du carbone : **0.0218 % de carbone maxi à 727° C.**

Caractéristiques mécaniques : **A % = 40 % ; Z = 80 % ; Rm = 25 daN/mm² = 250**

Mpa

3.2 LA PHASE AUSTENITIQUE (FER γ)

Domaine d'existence : **912° C à 1394° C.**

Dissolution du carbone : **2.11 % de carbone maxi à 1148° C.**

Caractéristiques mécaniques : **Pas d'élément de comparaison, mais on peut dire qu'elle va être ductile et résiliente**

3.3 LA CEMENTITE (FE₃C)

Domaine d'existence : **0° K à 1250° C.**

Dissolution du carbone : **6.67 % de carbone de 0° K à 1250° C.**

Caractéristiques mécaniques : **Dure et fragile**

3.4 LE POINT EUTECTIQUE

Définition : **Un alliage eutectique est un alliage qui se comporte comme un corps pur, il change d'état (solide / liquide) à une seule et même température.**

Domaine d'existence **4.3 % de carbone de 0° K à 1148° C (fusion).**

Ce point eutectique est appelé lédéburite, sa composition est donnée par la règle des segments inverses.

3.5 Le point eutectoïde

Définition : **Un alliage eutectoïde est un alliage qui change de phase (CC ; CFC) à une seule et même température. Le constituant eutectoïde est appelé perlite : Perlite = Ferrite + Cémentite (changement de phase à 727° C).**

Caractéristiques mécaniques : **Dur et résistant ; $R_m = 80 \text{ daN/mm}^2 = 800 \text{ Mpa}$.**

Application

Déterminer avec la règle des segments inverses la composition de la perlite.

Teneur en ferrite : **$(6.67 - 0.77) / 6.67 = 88.5\%$ de ferrite à **0.0218% de C.****

Teneur en cémentite : **$100 - 88.5 = 11.5 \%$ de cémentite à **6.67 % de C.****

% de carbone : **$\% \text{ de C} = 6.67 \times 11.5 / 100 = 0.767 \text{ de C.}$**

4. CONSTITUTION A L'EQUILIBRE DES ALLIAGES FER-CARBONE

4.1 ETUDE DE L'ACIER EUTECTOÏDE

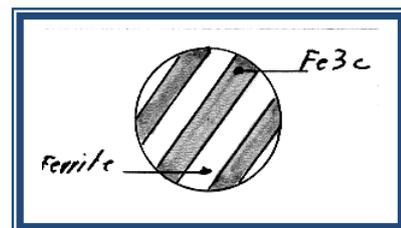
Déterminer sa composition à 1150° C : **0.77 % de C ; Phase γ ; Réseau CFC.**

Déterminer sa composition à 728° C : **Phase γ ; Réseau CFC.**

Déterminer sa composition à 726° C : **100 % Perlite = Ferrite et cémentite (Perlite lamellaire).**

Représentation microscopique

La transformation se fait par germination et croissance, c'est à dire qu'il y a apparition d'un grain (germination) puis d'autres grains autour (croissance).



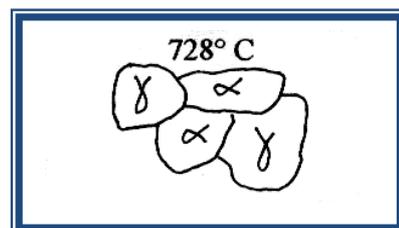
4.2 DETERMINATION D'UN ACIER A 0.4 % DE C

Déterminer sa composition à 1150° C : **Phase γ ; Réseau CFC à 0.4 % de carbone.**

Analyser l'évolution de 840° à 728° C :

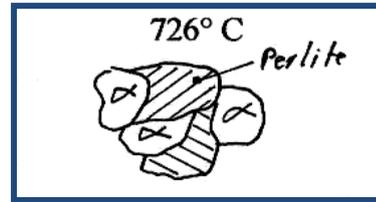
Apparition de la phase α .

L'austénite restant se charge en carbone (jusqu'à 0.77 %).



Déterminer son évolution à 726° C :

L'austénite qui s'est enrichie en carbone se transforme en perlite.

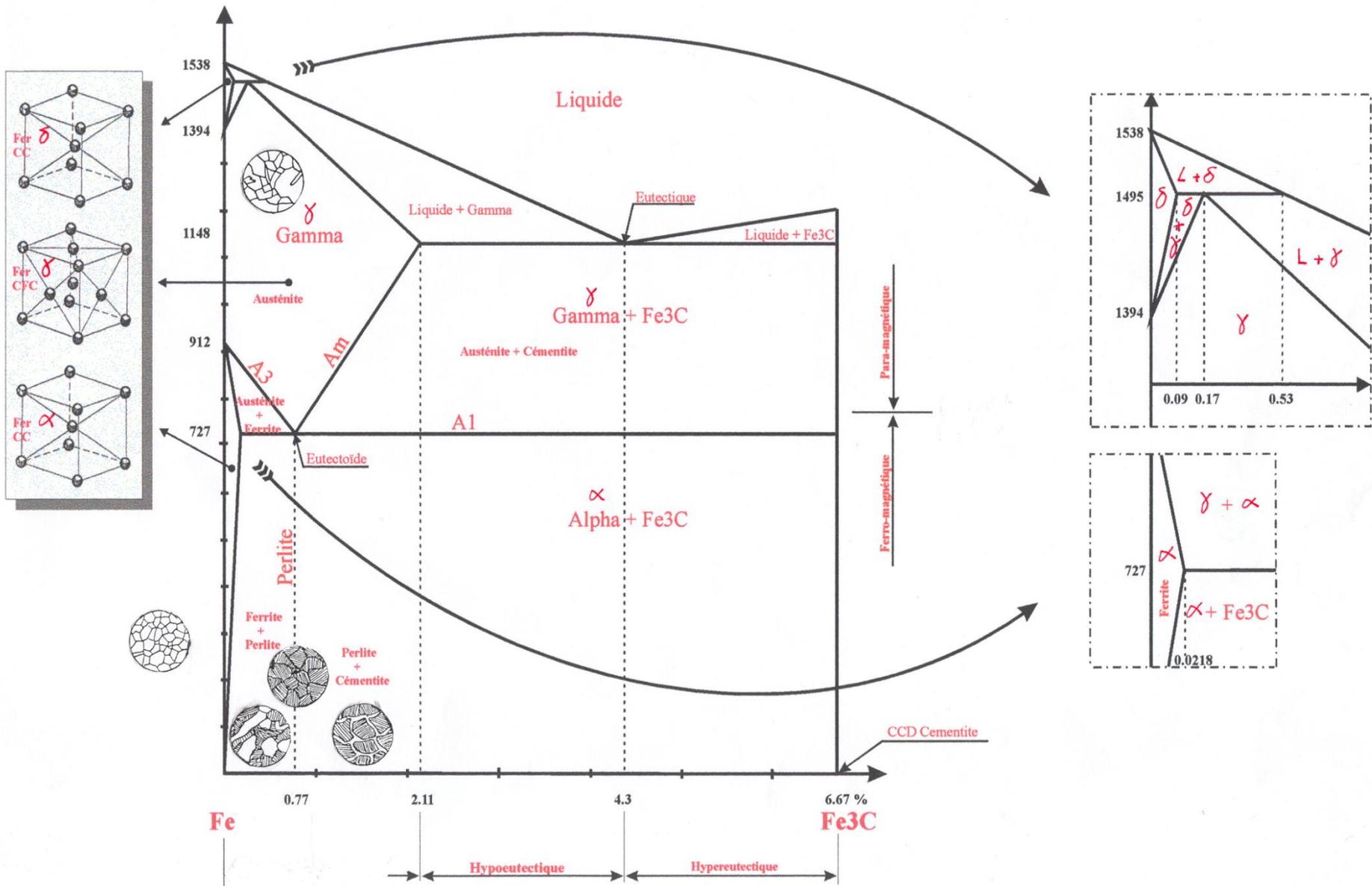


Déterminer son évolution à température ambiante : **La phase α rejette du carbone jusqu'à $\approx 0\%$ à 20° C.**

Déterminer la composition de l'acier à 0.4 % de Carbone :

A 726° C : $(0.4 - 0.0218) / (0.77 - 0.0218) = 50.5\%$ d'eutectoïde ou de perlite à 0.77 % de C et 49.5 % de ferrite (fer α).

DIAGRAMME FER-CEMENTITE



QUESTIONNAIRE SUR LE DIAGRAMME FER CEMENTITE

1. QUESTIONNAIRE

Compléter par une croix le tableau suivant et justifier vos réponses en vous aidant du diagramme donné en cours.

	VRAI	FAUX
A la température ambiante, tous les alliages Fe-C dont la teneur en C est > 0.002 % comportent de la cémentite.	X	
Justification : En dessous de 0.002 % de C., c'est du fer α . Il dissout très peu de cémentite. Il est considéré comme du fer pur.		
Un alliage hypoeutectoïde commence à fondre à une température inférieure à celle d'un alliage hypereutectoïde.		X
Justification : Avec 0.5 % de C la fusion débute à $\approx 1450^\circ$. Avec 1.1 % de C la fusion débute à $\approx 1320^\circ$.		
A 780° , un alliage ferrito-austénitique devient totalement austénitique si on lui ajoute du carbone.	X	
Justification : A 780° avec 0.3 % de C nous avons un alliage ferrite + austénite. A cette même température avec 0.7% de C nous n'avons plus que de l'austénite.		
Pendant l'échauffement, entre 720° et 1145° , la teneur en carbone d'un acier eutectoïde varie de 0.8 % à 2.11 %		X
Justification : Elle ne varie pas, puisque l'on se déplace suivant une verticale.		
Un alliage hypoeutectique commence à fondre à une température inférieure à celle d'un alliage hypereutectique.		X
Justification : Ils commencent à fondre tous les deux à 1148° .		

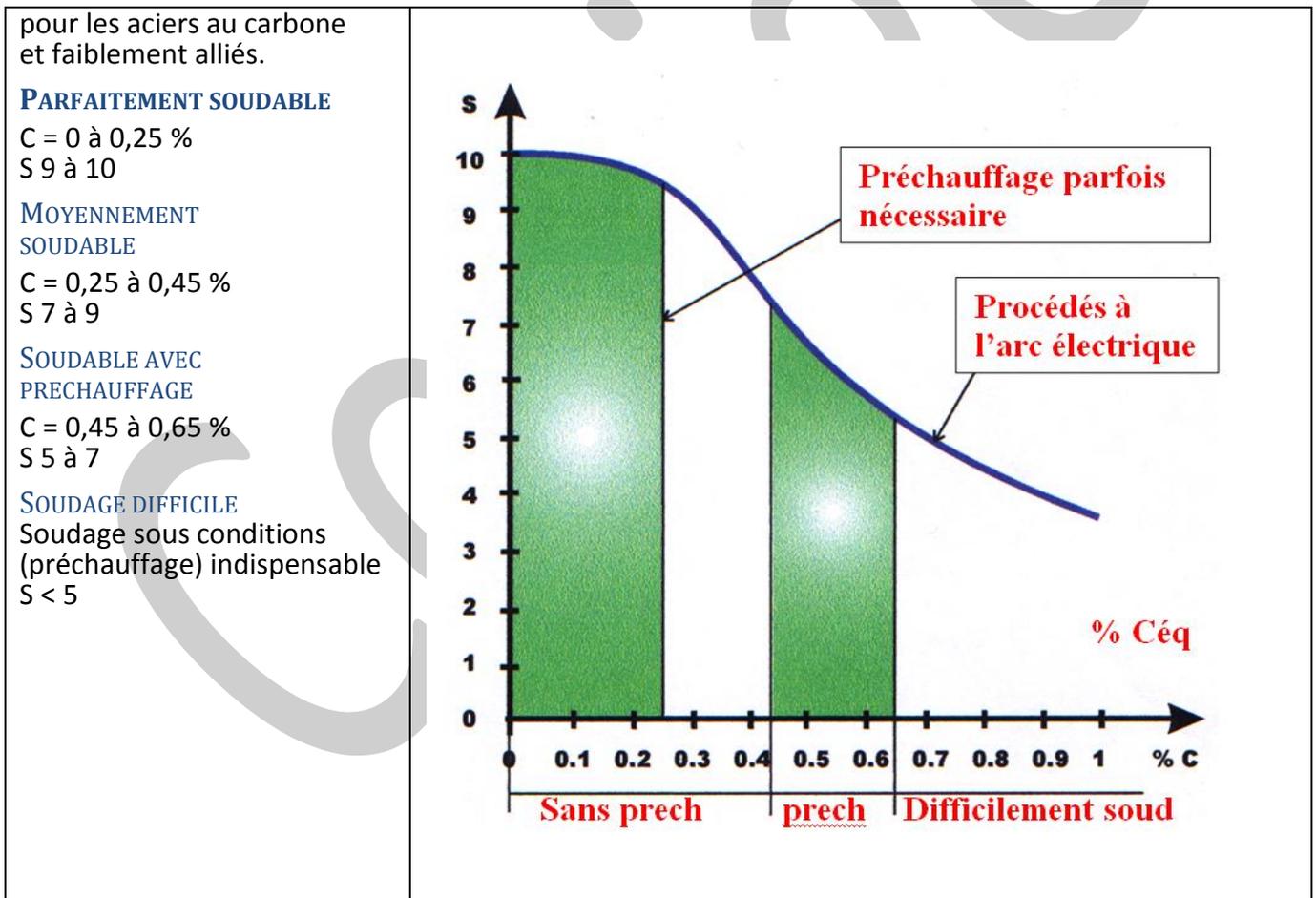
4. SOUDABILITE DES ACIERS NON ALLIES ET FAIBLEMENT ALLIES

1 - SOUDABILITE :

On désigne par soudabilité l'aptitude des métaux à être assemblés par fusion. La soudabilité varie en sens inverse de la teneur en carbone et en C_{éq}. Le C_{éq} détermine le pouvoir trempant d'un acier (%C_{éq} = %C + % de certains éléments d'addition coefficientés).

Si l'on représente cette soudabilité par un coefficient : **S** variant de 0 à 10, la courbe fig. 1 représente la variation de **S** en fonction de la teneur en carbone de l'acier.

COEFFICIENT DE SOUDABILITE S



Pourquoi le préchauffage : Refroidissement rapide donc dureté. Remède ; allonger temps de refroidissement. Il n'est appelé préchauffage qu'à partir de 100°C avant c'est un dégourdissement .

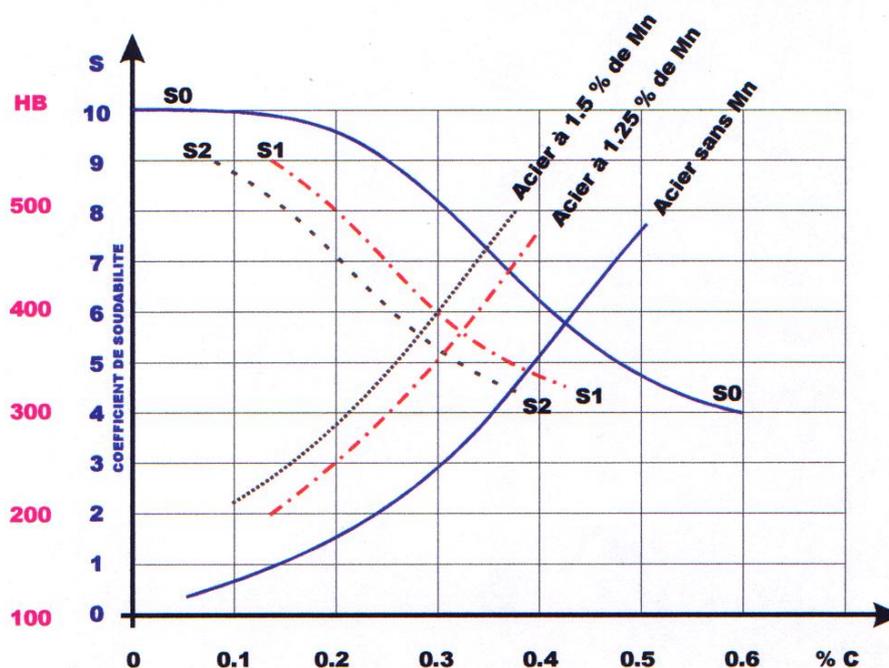
2 - INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION :

Les éléments d'addition les plus importants entrant dans la composition des aciers sont : le manganèse, le nickel, le chrome, le molybdène car ils tendent à augmenter le pouvoir trempant du métal.

La fig. 2 met en évidence l'influence du manganèse sur la soudabilité, ainsi un acier à 0,2 % de C + 1,5 % de manganèse a une soudabilité analogue à un acier à 0,35 % de carbone.

Nous retiendrons que la soudabilité décroît lorsque le pouvoir trempant (Céq) de l'acier augmente

INFLUENCE DU MANGANÈSE SUR LA SOUDABILITÉ



3 - DU CARBONE EQUIVALENT D'APRES L'IIS :

L'Institut International de Soudure a mis au point une formule permettant de calculer le carbone équivalent : $Céq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$

Ainsi que le carbone équivalent compensé qui tient compte de l'épaisseur à souder :

$$CEC = Céq + 0.0254 \times E$$

Application : On veut souder une pièce en acier 25 Cr Mo 4, quel est cet acier, analysez sa soudabilité en fonction de son % de carbone, faites de même en prenant en compte son carbone équivalent, que pouvez vous en conclure ? (Mn : 0.5%, Mo : 0.2%, Ni : 0.1%)

Acier faiblement allié, aucun élément d'addition n'atteint 5%. %C = 0.25%

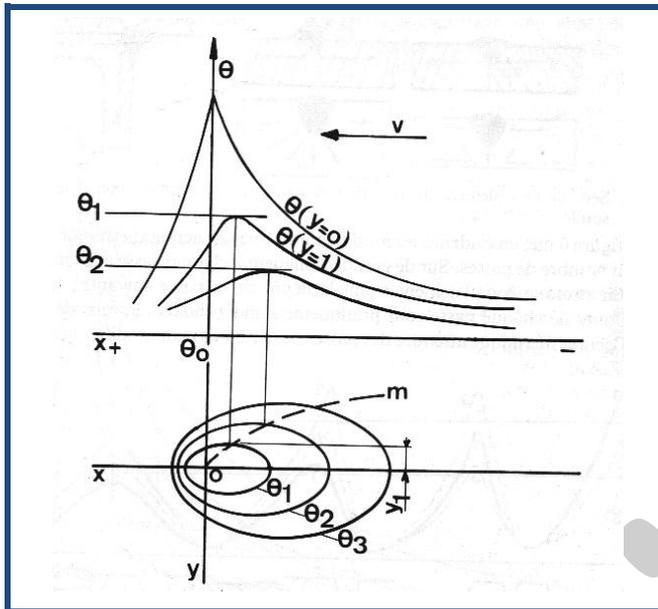
% Cr = 1% ; des traces de molybdène. %C = 0.25% acier parfaitement soudable (s

Céq = 0.25 + (0.5/6) + ((1+0.2)/5) + (0.1/15) = 0.58%; acier moyennement soudable

avec préchauffage. Il est donc obligatoire de considérer le Céq de l'acier.

4 - REPARTITION THERMIQUE DANS LES ASSEMBLAGES SOUDES :

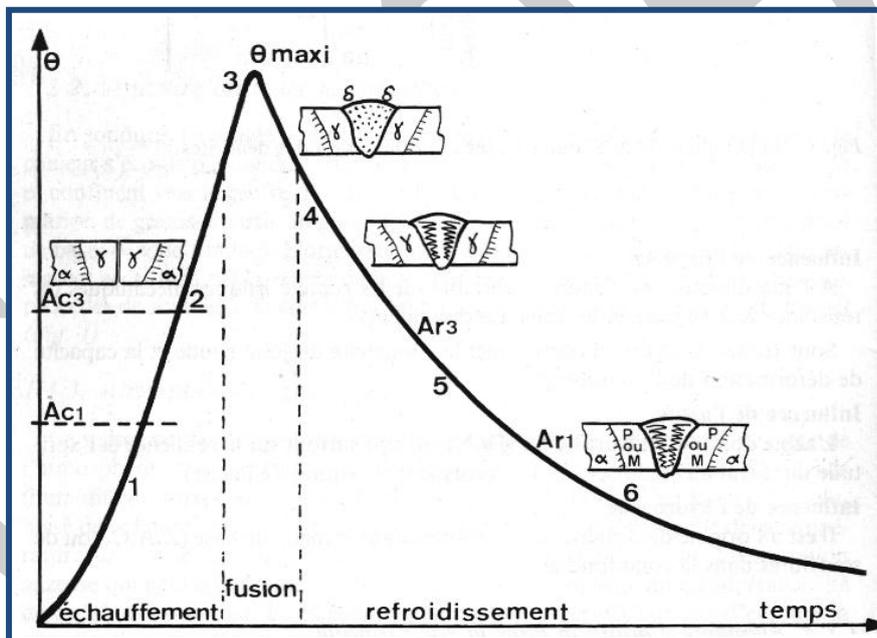
Lorsqu'on fait une soudure, la répartition thermique à l'intérieur de celle-ci (diffusion de la chaleur), s'effectue suivant des lignes isothermes.



Isotherme :

courbe dont tous les points ont la même température.

CYCLE THERMIQUE EN SOUDAGE



1 – Dilatation Ac1 : Détensionnement

2 – Ac3 : austénisation (changement de maille).

3 – Zone fondue : fusion et dilution du MA et du MB.

4 – Solidification Ar3 : formation de dendrites, retrait, contraintes.

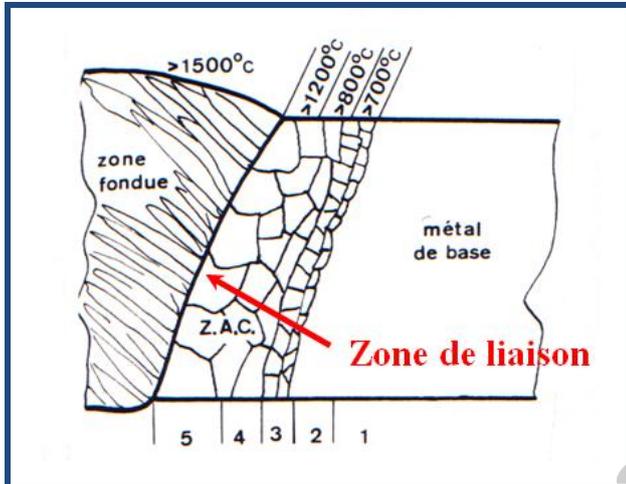
5 – Transformations allotropiques Ar1: trempe (martensite), recuit (perlite).

6 – Fin de transformation : contraintes résiduelles, déformations, rupture.

5 - ZAC OU ZAT :

ZONE AFFECTEE PAR LA CHALEUR OU ZONE AFFECTEE THERMIQUEMENT

Aux abords immédiats de la zone fondue, le métal subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations liées à la température maximale atteinte et aux conditions de refroidissement du joint soudé.



Différentes régions de la ZAC et microstructures au voisinage de la zone fondue.

1 et 2 Métal de base : température peu élevée ou ambiante, aucune transformation
3, 4 et 5 – Le grain grossi jusqu'à l'approche du bain de fusion, c'est la ZAT. C'est dans cette région que les risques de fissures à froid peuvent naître, ainsi que les modifications des caractéristiques mécaniques du métal.

6 - INFLUENCE DES PRINCIPAUX ELEMENTS D'ADDITION :

Tous les éléments qui suivent favorisent le pouvoir trempant de l'acier mais également :

Carbone : Nécessaire pour accroître la résistance à la rupture et la dureté.

Manganèse : Neutralise la fragilité engendrée par les sulfures (composition du soufre avec un autre corps).

Nickel : Il améliore la dureté et la résistance à la traction.

Chrome : Il augmente la résistance à la corrosion et à l'oxydation.

Molybdène : Il accroît la résistance à chaud et à l'abrasion.

7 - METHODES RESOLVANT LES PROBLEMES METALLURGIQUES :

Il est étudié dans le cadre de la formation 4 méthodes.

- 2 sont basées sur le carbone équivalent : **BWRA, SEFERIAN.**
- Les 2 autres prennent en compte l'énergie de soudage : **IRSID, BAUS ET CHAPEAU.**

LES METHODES : BWRA ET SEFERIAN

1 METHODE BWRA : **British Welding Research Association**

1. Cette méthode basée sur le « pouvoir trempant » de l'acier, est réservée au soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée. Elle consiste à calculer la température de préchauffage des pièces en tenant compte des paramètres suivants :

- Indice de sévérité thermique,
- Indice de soudabilité,
- **Diamètre des électrodes.**

1.1 INDICE DE SEVERITE THERMIQUE :

Il caractérise la géométrie et l'épaisseur de l'assemblage. L'indice T.S.N. est obtenu en divisant la somme des épaisseurs à souder (en mm) par 6 (unité d'épaisseur).

$$T.S.N. = \frac{\text{Somme des épaisseurs}}{6}$$

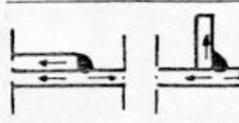
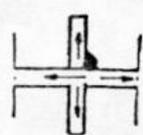
La somme des épaisseurs est fonction du Nb de chemins de dispersion.

Ex : soudage en T ép. 6 avec ép. 6, 3 chemins de dispersion

$$TSN = (6+6+6)/6 = 3$$

TSN: THERMIC SEVERITY NUMBER

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de l'indice T.S.N. pour les types d'assemblage les plus courants.

Type de joint	Épaisseur des tôles (mm)	T.S.N.
 Deux chemins de dispersion de la chaleur	6 et 6	2
	6 et 12	3
	6 et 18	4
	12 et 12	4
	24 et 24	8
	24 et 48	12
 Trois chemins de dispersion de la chaleur	6 et 6	3
	12 et 12	6
	24 et 24	12
 Quatre chemins de dispersion de la chaleur	6 et 6	4
	12 et 12	8
	24 et 24	16
	6 + 12 + 12 + 12	7

1.2 INDICE DE SOUDABILITE :

Il est fonction du pourcentage en Cég., de l'acier à souder, ainsi que de la nature des électrodes utilisées. Le tableau ci-dessous permet de le déterminer après avoir calculé le Cég. Par la formule :

$[C] = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$		indices de soudabilité
Electrodes rutiles	Electrodes Basiques	
jusqu'à [C] = 0,20	jusqu'à [C] = 0,25	A
– 0,21 à 0,23	– 0,26 à 0,30	B
– 0,24 à 0,27	– 0,31 à 0,35	C
– 0,28 à 0,32	– 0,36 à 0,40	D
– 0,33 à 0,38	– 0,41 à 0,45	E
– 0,39 à 0,45	– 0,46 à 0,50	F
– > 0,45	– > 0,50	G

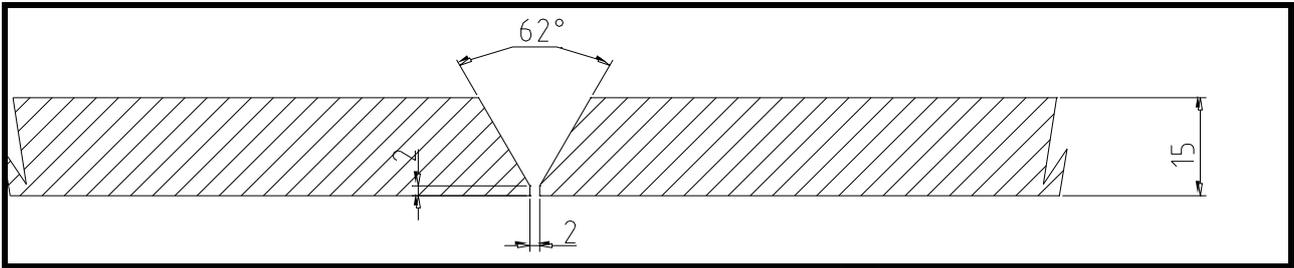
1.3 DIAMETRE DES ELECTRODES ET TEMPERATURE DE PRECHAUFFAGE :

La quantité de chaleur transmise au joint étant liée au diamètre des électrodes utilisées, on prend en compte ce paramètre pour le calcul de Tp (Température de préchauffage).

Chiffre de sévérité thermique	Indice de soudabilité	Température minimum à laquelle doit être effectuée la soudure				
		Diamètre des électrodes en millimètres				
		3.2	4	5	6	8
		(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)
T.S.N. 2	D	0	0			
	E	50	25			
	F	125				
T.S.N. 3	C	0	0			
	D	75	25	0		
	E	100	100	25		
T.S.N. 4	D	50	25			
	E	100	75	0		
	F	125	125	75	0	
T.S.N. 6	B	50	25			
	C	100	100	25		
	D	150	125	75	0	
T.S.N. 8	E	175	175	125	75	0
	F	225	200	175	125	50
		225	200	175	125	50
T.S.N. 12	A	25	25			
	B	75	75	25		
	C	125	125	75	0	
T.S.N. 16	D	150	175	125	75	0
	E	200	200	175	125	50
	F	225	200	200	150	100
T.S.N. 24	A	75	25	0		
	B	125	75	50	0	
	C	175	150	125	50	25
T.S.N. 24	D	200	175	175	125	50
	E	225	200	200	175	100
	F	250	250	225	200	150

2. APPLICATION :

On se propose de souder à l'arc électrique à l'électrode enrobée basique 2 tôles d'acier **10 CD 9 10** de **15 mm** d'épaisseur, chanfrein en **V** pas de reprise envers.



On réalise une passe de fond à l'électrode $\varnothing 3.15$ et deux passes de remplissage $\varnothing 5$. Electrode, SAFER CD 65 SC, basique pour acier faiblement allié.

Analyse chimique:

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P
10 CD 9 10	0.10	0.5	0.35	2.06	0.23	0.91	0.17	0.017	0.009

- 1/ - Quel est cet acier, donner la correspondance dans la NE ?
- 2/ - Donner la polarité et le type de poste pour effectuer la soudure.
- 3/ - Vérifier s'il y a besoin d'un préchauffage.

1/ - 10 CD 9-10 : acier faiblement allié avec 0.1% de C, 2.25% de Cr et 1% de Mo. Nf EN 10 Cr Mo 9-10.

2/ - Calcul des paramètres : $I_{s3.15} = 50 \times (d-1) = 110 \text{ A}$

$$U_{s3.15} = (0.04 \times I_{s3.15}) + 21 = 25.4 \text{ V}$$

$$I_{s5} = 200 \text{ A}; U_{s5} = 29 \text{ V}$$

Electrode basique, I_s maxi 200A, 29V à 60%. Poste SAFEX C1, M450 en C.

3/ - Electrode diamètre 3.2 : $TSN = (15+15)/6 = 5$

$$C_{\text{éq}} = 0.1 + (0.5/20) + (0.23/15) + ((2.06+0.91)/10) = 0.44$$

Indice de soudabilité : E ; $TSN 4E T_p = 125^\circ\text{C}$; $TSN 6E T_p = 175^\circ\text{C}$

$$TSN 5E T_p = (125+175)/2 = 150^\circ\text{C}$$

Electrode diamètre 5 : $TSN 5E T_p = (0 + 75)/2 = 37.5^\circ\text{C}$ donc pas de préchauffage (Nb : si on prend une électrode plus grosse, pas de préchauffage).

3. METHODE SEFERIAN :

Cette méthode est également basée sur le « pouvoir trempant », elle consiste, pour un acier donné, à déterminer la température de préchauffage des pièces à souder, de manière à éviter un refroidissement trop rapide du joint qui conduirait à la formation d'une structure fragile (martensite) dans la Z.A.C.. Le calcul de cette température de préchauffage s'effectue en trois étapes :

- Calcul du carbone équivalent (Ceq),
- Calcul du carbone équivalent compensé (Ceq.C),
- Calcul de la température de préchauffage (Tp).

3.1 CARBONE EQUIVALENT : EXPRESSION DE SEFERIAN

$$\text{Ceq.} = \text{C} + \frac{\text{Mn} + \text{Cr}}{9} + \frac{\text{Ni}}{18} + \frac{7 \text{ Mo}}{90}$$

3.2 CARBONE EQUIVALENT COMPENSE

Le carbone équivalent compensé (**Ceq.C**) tient compte de l'**épaisseur** des pièces à assembler (influence de la vitesse de refroidissement) ainsi que du carbone équivalent (**Ceq**).

Il est défini par la formule :

$$\text{Ceq.C} = \text{Ceq.} (1 + 0.005 e)$$

e : Epaisseur moyenne des tôles en mm.

3.3 TEMPERATURE DE PRECHAUFFAGE DES PIECES A SOUDER (1)

Elle est calculée en fonction du Ceq.C par l'expression suivante :

$$\text{Tp} = 350 \sqrt{\text{Ceq.C} - 0.25}$$

(1) Le diagramme page suivante détermine Tp, directement à partir de Ceq. et de e.

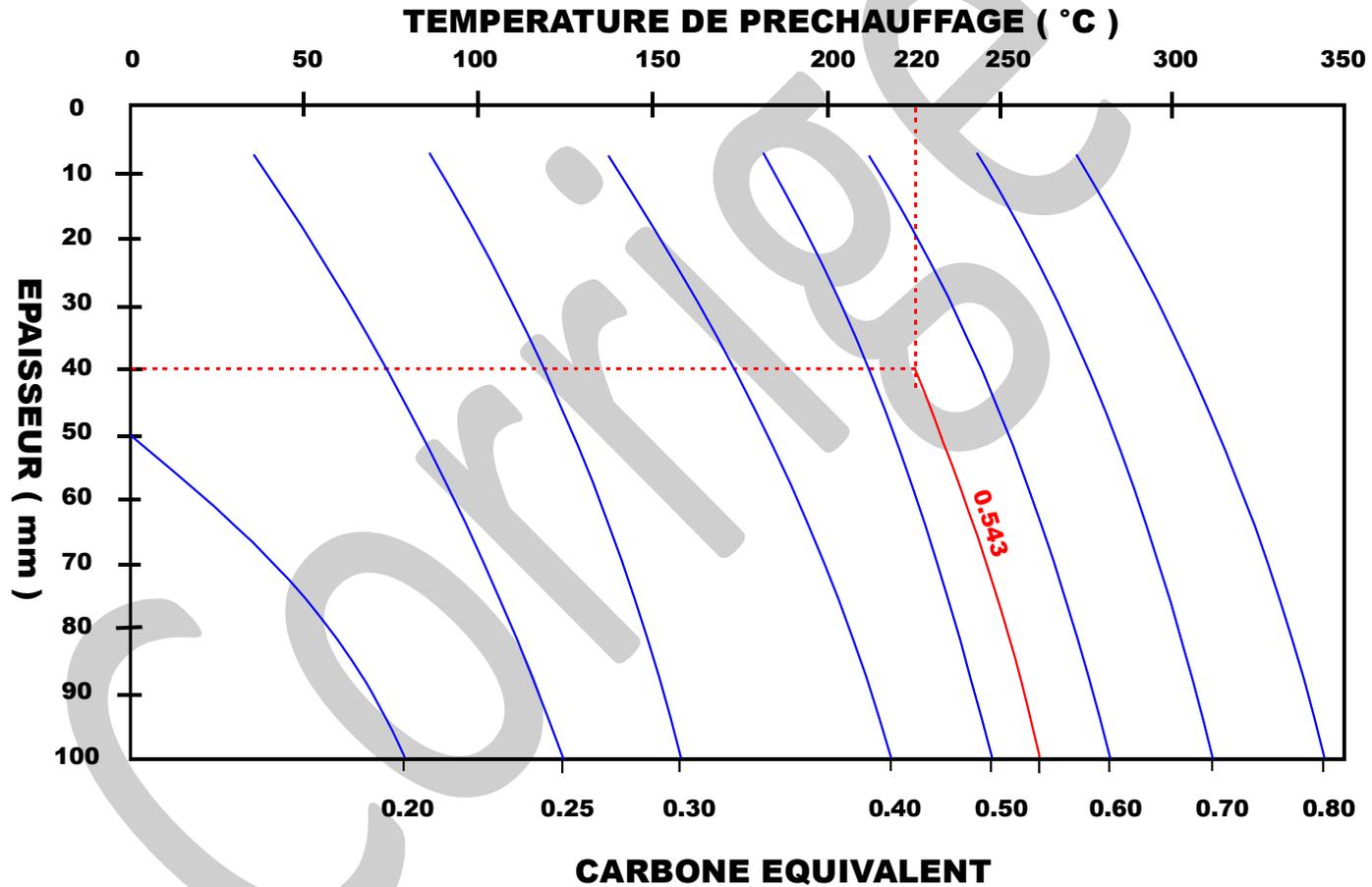
4. APPLICATION :

Reprendre la même application que le N°2 comparez les deux méthodes.

Après cette étude que pouvez vous dire de la soudabilité de cet acier, de son pouvoir trempant, quelle est la différence ?

Corrigé en fin de dossier

PRECHAUFFAGE DES ACIERS AU CARBONE ET FAIBLEMENT ALLIES DIAGRAMME DE SEFERIAN



UTILISATION : Le diagramme permet de déterminer la température de préchauffage, directement à partir du carbone équivalent Ceq..
Par exemple :

Pour Ceq. = 0.543 et e = 40 mm, Tp = 220°C

APPLICATION N° 1 SEFERIAN - BWRA

On se propose d'étudier l'assemblage des repères 101 et 102 suivant le plan de la roue à auge. Cette soudure est réalisée à l'arc électrique à l'électrode enrobée basique. Tous les usinages du moyeu (trou Ø 125 et rainure de clavette) seront réalisés après soudage.

1 seule passe sera suffisante, le joint sera effectué avec une électrode Ø 5.

Analyse chimique des matériaux en présence :

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	S	P
S355 JO	0.17	1.4	0.45					0.063	0.026	0.027
C35	0.35	0.63	0.27	0.05	0.05	0.14	0.02		0.015	0.022

1/ - Quelle est la longueur de la soudure, faire le schéma coté de l'assemblage.

2/ - Expliquer la désignation de ces aciers, sont-ils parfaitement soudables?

3/ - Donner la polarité, les paramètres de soudage et le type de poste pour effectuer la soudure.

4/ - Vérifier s'il y a besoin d'un préchauffage avec les méthodes **BWRA** et **SEFERIAN**.

Corrigé en fin de dossier

Page 48

ENERGIE DE SOUDAGE VITESSE DE REFROIDISSEMENT-TRCS

1. ENERGIE NOMINALE DE SOUDAGE :

C'est l'énergie fournie au niveau de l'arc électrique pour exécuter une soudure. Elle correspond à une puissance P pendant un temps t.

Elle s'exprime en **j/cm** avec

$$E_n = U.I / V$$

Elle s'exprime en **kJ/cm** avec

$$E_n = 60.U.I / 1000.V$$

2. ENERGIES NOMINALES ET VITESSES DE SOUDAGE

Ce tableau donne l'énergie nominale (En) en fonction du \varnothing de l'électrode, de la longueur du cordon ou de la vitesse de soudage Vs.

\varnothing des électrodes	2.5	3.2	4	5	
Longueur utile	300	400	400	400	
Intensité en A	75	110	150	200	
Tension en Volts	24	25.4	27	29	
Tps fusion d'une électrode	64	82	92	110	
Longueur du cordon en cm pour 10 cm d'électrode consommée					
Energie Nominale en kJ / cm	6	6.4	9.5	15.5	26.6
	8	4.8	7.2	11.6	19.9
	10	3.8	5.7	9.3	16
	12	3.2	4.8	7.8	13.3
	14	2.7	4.1	6.7	11.4
	16		3.6	5.8	10
	18		3.2	5.2	8.9
	20		2.9	4.7	8
	25		2.3	3.7	6.4
	30			3.1	5.3
	40			2.3	4
50				3.2	

\varnothing des électrodes	2.5	3.2	4	5	
Vitesse de soudage cm / mn					
Energie Nominale en kJ / cm	6	18	27.9	40.5	58
	8	13.5	21	30.4	43.5
	10	10.8	16.8	24.3	34.8
	12	9	14	20.3	29
	14	7.7	12	17.4	24.9
	16		10.5	15.2	21.8
	18		9.3	13.5	19.3
	20		8.4	12.2	17.4
	25		6.7	9.7	13.9
	30			8.1	11.6
	40			6.1	8.7
50				7	

Exemple : Donner la vitesse de soudage et l'En pour le soudage d'un S 355 épaisseur 8 mm chanfreinée en V à 60°. Pour la passe de fond $\varnothing 3.2$, pour une passe de remplissage $\varnothing 4$. Ces deux passes sont-elles suffisantes ?

Passe de fond électrode $\varnothing 3.2$ En = 8 kJ/cm, Vs = 21 cm/mn

Passe de remplissage électrode $\varnothing 4$ En = 18 kJ/cm, Vs = 13.5 cm/mn

Surface du chanfrein : 45 mm² avec 20% de plus pour la partie bombée.

Surface $\varnothing 3.2$: 11.2 mm² (($\pi d^2/4$) x10/lg de cordon)

Surface $\varnothing 4$: 24.2 mm²

Non ce n'est pas suffisant, il faudrait 1 passe de plus.

3. COURBES TRCS :

La fissuration à froid est, de loin, le défaut le plus redouté dans le soudage des aciers. Le désir d'éviter cette fissuration est à la source de la plupart des critères évoqués dans le contexte du soudage : carbone équivalent, dureté sous cordon, etc..., dont la validité n'est pas absolue.

L'Institut de Soudure a mis au point des courbes de Transformation en Refroidissement Continu en condition de Soudage (TRCS).

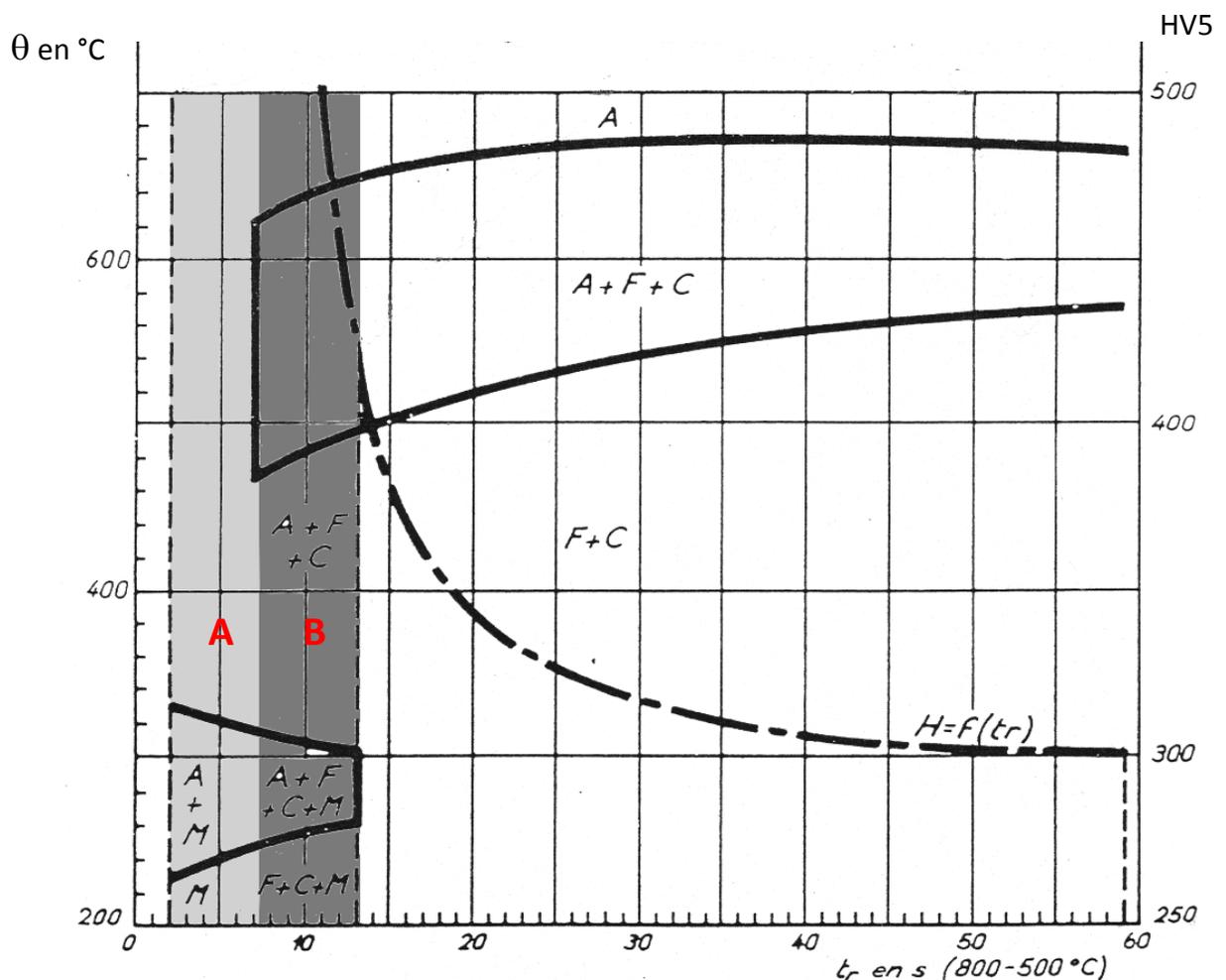
DIAGRAMME TRCS ACIER C45

Composition chimique :

C	MN	Si
0.46	0.73	0.28

Caractéristiques mécaniques :

Rm = 780 N/mm² Re = 460 N/mm² A% = 24



Courbe TRCS d'un C45 :

Si la Vitesse de Refroidissement Vr ou tr < 13 s (nez Martensitique), nous considérons deux cas :

A - 2s < tr < 7s : structure 100% Martensitique. H > 500 HV5.

B - 7s < tr < 13s : structure Bainitique (M+F+C). H mini = 425 HV5.

Ces structures sont rencontrées dans la ZAT si le pouvoir trempant de l'acier est suffisant et la vitesse de refroidissement rapide.

Si la Vitesse de Refroidissement Vr ou tr > 13 s :

Nous ne passons plus dans le nez martensitique, la structure est 100 % F + C la dureté Vickers chute donc plus de trempe dans la ZAT.

Ces mêmes courbes TRCS présentent la courbe de dureté(trait mixte) avec des graduations en ordonnée droite, exprimées en HV5 :

L'essai de filiation permet de donner la zone la plus dure de la soudure (ZAT cordon) cette dureté ne doit pas excéder HVc donnée dans la norme EN 15614-1 calculée par la formule : $HVc = 240 + (790 \times \%C)$.

Il est évident d'après cette courbe que la dureté augmente considérablement avec la rapidité du refroidissement.

Pour pouvoir utiliser ces TRCS il faut calculer le temps de refroidissement tr ou Δt . Deux méthodes nous sont proposées **IRSID** et **BAUS** et **CHAPEAU**.

4. METHODE DE L'IRSID:

L'Institut de Recherche de la **SID**érgie française (IRSID) à mis au point un abaque qui permet de déterminer la nécessité ou non d'un préchauffage.

Il permet, également de calculer la vitesse de refroidissement entre 800 et 500°C Δt . la courbe IRSID s'utilise en association avec les diagrammes TRCS. Elle utilise les paramètres suivants:

- Energie nominale $E_n = U.I/V$
en fait $E_n = 60.U.I/1000 V$.
- Energie corrigée qui tient compte de la géométrie du joint $E_c = E_n.k$
- Energie équivalente qui tient compte de la géométrie de l'assemblage et du rendement d'arc η (pertes par rayonnement par exemple) :

$E_q = E_c.\eta = E_n.k.\eta$ $\eta = 1$ pour le soudage à l'électrode enrobée et sous flux solide.

$\eta = 0.7$ pour le soudage MIG MAG

$\eta = 0.5$ pour le soudage TIG.

Avec E_n, E_c, E_q en kJ/cm

- Epaisseur des pièces à souder en mm.

		Soudage à plat					k = 1
		enja	0	0,25	0,5	0,75	1
		k	1	0,97	0,89	0,78	0,67
avec chanfrein							
forme	α	60°	75°	90°	105°		
	k	0,60	0,63	0,67	0,70		
	k	1,50	1,72	2	2,38		
	k	0,75	0,85	1	1,20		

Soudure d'angle a / s = 0 k = 1 âme = 0, on se ramène en soudage à plat

A – POUR OBTENIR LE POINT ⑤

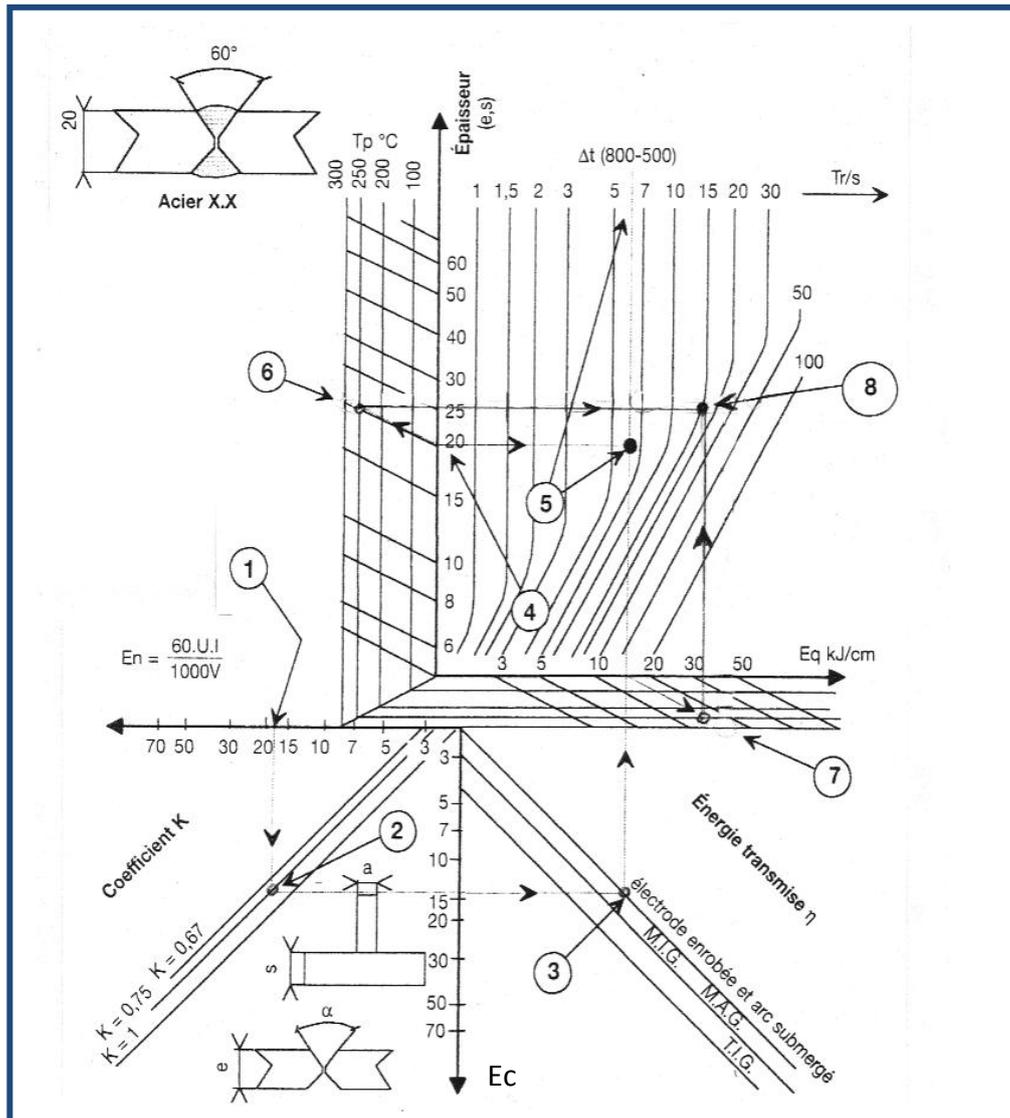
Selon l'assemblage à réaliser, le soudeur émet l'hypothèse d'une $E_n = 18 \text{ kJ}$ pour une électrode de $\varnothing 4 \text{ mm}$ ① **Page 2, passe de remplissage**

Page 1 $k = 0.75$ ② $\varnothing 4, 111\eta = 1$ ③ **Schéma ci dessous** Epaisseur = **20** ④

Le point ⑤ nous donne $\Delta t_{500}^{800} = 6 \text{ s (tr)}$. Structure Martensitique (trempe) HV5 > 500 (feuille 28)

NB : Si on ne peut pas placer K calculer E_c ou E_q (formule) pour partir de la droite correspondante, de plus c'est plus précis.

Abaque thermique général de l'IRSID didactisé



B – POUR OBTENIR LE POINT ⑧

D'après la norme NF EN 1614-1 la dureté critique $HV_c = 380$ (si on la calcule avec la formule de la page 3 c'est environ 600). Nous prendrons $HV_c = 380$

La vitesse de refroidissement à partir de la TRCS : **14.5s mini**

La température de préchauffage sera de : **250 ° C points ⑥ et ⑦ ce qui donne**

$\Delta t_{500}^{800} = 15 \text{ s (tr)}$ point ⑧.

Cette méthode prend en compte les paramètres de soudage, la géométrie du joint, le rendement, l'épaisseur du matériau, la composition chimique (TRCS). Elle est complète.

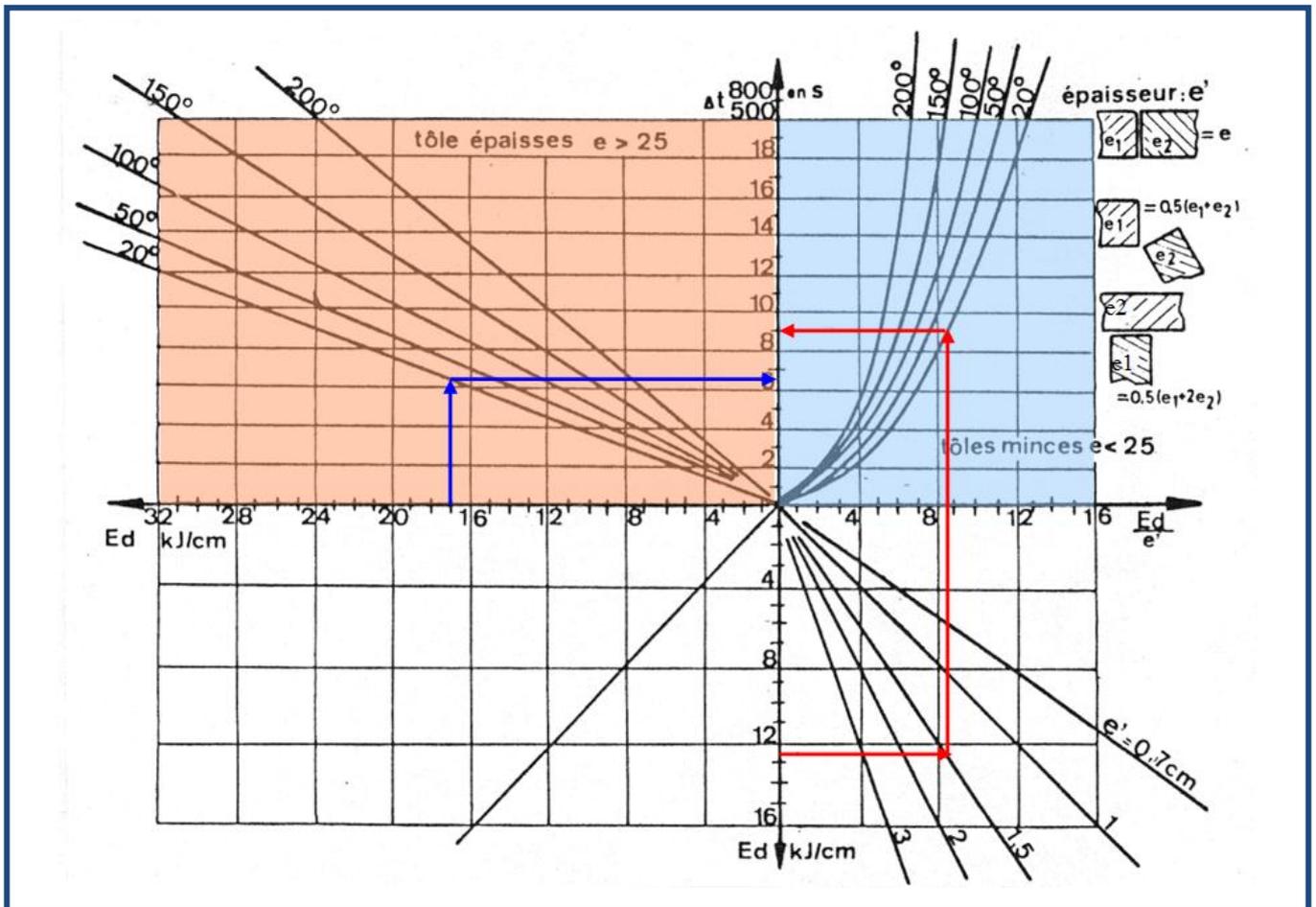
5. METHODE DE BAUS ET CHAPEAU :

Les expressions des durées de refroidissement sont déduites des expressions de la répartition thermique de la chaleur dans les assemblages soudés.

Pour éviter les calculs, on utilise l'abaque établi par BAUS et CHAPEAU à partir de ces expressions des durées de refroidissement. Cet abaque permet de déterminer indifféremment :

- La durée de refroidissement $\Delta t_{\frac{800}{500}}$,
- L'énergie de soudage nécessaire en fonction de la géométrie du joint soudé, on utilise l'énergie dissipée **$Ed = En \times \eta$** .
- La température de préchauffage, si besoin est.

Abaque thermique de BAUS et CHAPEAU



- UTILISATION DE L'ABAQUE:

Quadrant supérieur gauche **orange**

On l'utilise pour les tôles épaisses ($e > 25\text{mm}$) en soudage bout à bout avec chanfrein en V.

Pour différentes températures 20 à 200°C, on lit l'évolution de la durée de refroidissement

$\Delta t_{\frac{800}{500}}$ = en fonction de l'énergie dissipée Ed .

Avec $Ed = En \cdot \eta$

η_1 tôles minces

η_2 tôles épaisses

Soudage sous flux solide

0.9

0.99

Soudage électrode enrobée

0.7

0.85

MIG, MAG

0.65

0.85

TIG

0.3

0.48

- Pour $T_0 = 20\text{ °C}$ et $E_d = 17\text{ kJ/cm}$, $\Delta t_{500}^{800} = \mathbf{6.5\text{ s}}$

- Pour $T_0 = 200\text{ °C}$ et $E_d = 17\text{ kJ/cm}$, $\Delta t_{500}^{800} = \mathbf{14\text{ s}}$

- Remarque : Pour les tôles très épaisses chanfreinées en X, la valeur de Δt_{500}^{800} est divisée par 2

Tôles très épaisses : $e > 40\text{mm}$

Quadrant supérieur droit **bleu**

Il est utilisé pour le soudage des **tôles minces ($e < 25\text{mm}$)** en **bout à bout**, en **L**, ou en **T**.

Pour différentes températures 20 à 200°C, on lit l'évolution de la durée de refroidissement Δt_{500}^{800} en fonction de l'énergie dissipée E_d/e' (e' : épaisseur combinée en cm). L'écoulement du flux thermique ou de la chaleur (calcul de e') dépend du nombre de chemins de **dispersion** de la chaleur (voir les schémas sur l'abaque page 5).

Par exemple : deux tôles d'épaisseur 10 mm sont soudées en T avec électrodes enrobées. L'énergie nominale de soudage étant de 18 kJ/cm.

On détermine E_d et e' :
- $E_d = E_n \times \eta = 18 \times 0.7 = \mathbf{12.6\text{ kJ/cm}}$
- $e' = 0.5 (e_1 + 2e_2) = 0.5 (1 + 2) = \mathbf{1.5\text{ cm}}$

Sur le quadrant inférieur droit, à partir de ces deux valeurs, on obtient

$$E_d/e' = \mathbf{12.6 / 1.5 = 8.4\text{ kJ/cm}}$$

On détermine ensuite Δt_{500}^{800} à partir du quadrant supérieur droit. Le soudage s'effectue à température ambiante, 20°C, la vitesse de refroidissement entre 800 et 500°C $\Delta t_{500}^{800} = \mathbf{9\text{ s}}$

APPLICATION N° 1 IRSID BAUS ET CHAPEAU

DONNEES TECHNIQUES :

On se propose d'étudier l'assemblage des repères 102 et 103 suivant le plan de la roue à auge. Cette soudure est réalisée à l'arc électrique à l'électrode enrobée basique.

3 passes seront nécessaires de chaque côté du chanfrein. Première passe \varnothing 3.15, les deux dernières seront effectuées avec une électrode \varnothing 5.

TRAVAIL DEMANDE :

1 - Calculez tous les paramètres de soudage pour une énergie $E_n = 12$ kJ/cm pour le \varnothing 3.15 et $E_n = 20$ kJ/cm pour le \varnothing 5. Donnez le type et la polarité du poste à utiliser. Quel est le paramètre qui varie lorsque l'énergie nominale varie.

2 - Quelle sera la vitesse de refroidissement. Donnez la structure et la dureté dans la ZAT pour cette vitesse. Pour trouver les valeurs demandées, on utilisera la courbe TRCS ainsi que les abaques IRSID et BAUSS & CHAPEAU.

3 - Est-il nécessaire d'effectuer un préchauffage en prenant comme condition que la dureté de la ZAT doit être inférieure à la dureté critique $H_{Vc} = 380$ (NF EN 15614-1). Calculez si besoin est.

4 - Comparez avec les résultats obtenus avec ces deux méthodes, que pouvez vous en conclure.

MARCHE A SUIVRE METHODE IRSID :

- a. Classer l'acier (NF EN 15614-1), choisir k (cours).
- b. Calculer la vitesse de refroidissement (IRSID).
- c. Trouver H_{Vc} (NF EN 15614-1), donner la vitesse de refroidissement minimale (TRCS).
- d. Comparer la vitesse de refroidissement IRSID et la vitesse de refroidissement minimale TRCS.
- e. Calculer la température de préchauffage si nécessaire.

Faire de même pour la méthode BAUS ET CHAPEAU.

DIAGRAMME TRCS DU S 355

Analyse chimique du matériau :

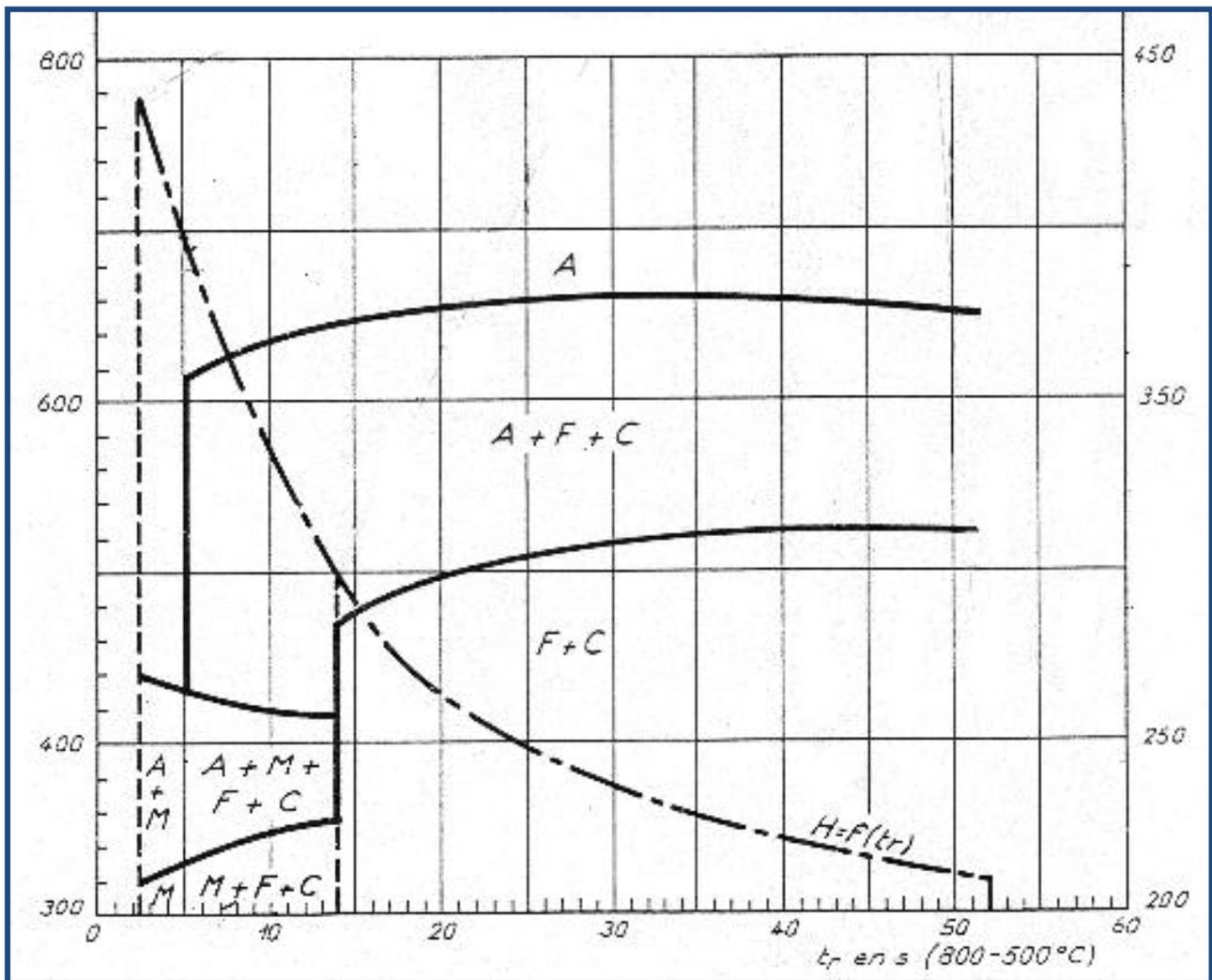
	C	Mn	Si	Al	S	P
S355 JO	0.17	1.4	0.45	0.063	0.026	0.027

Caractéristiques de traction :

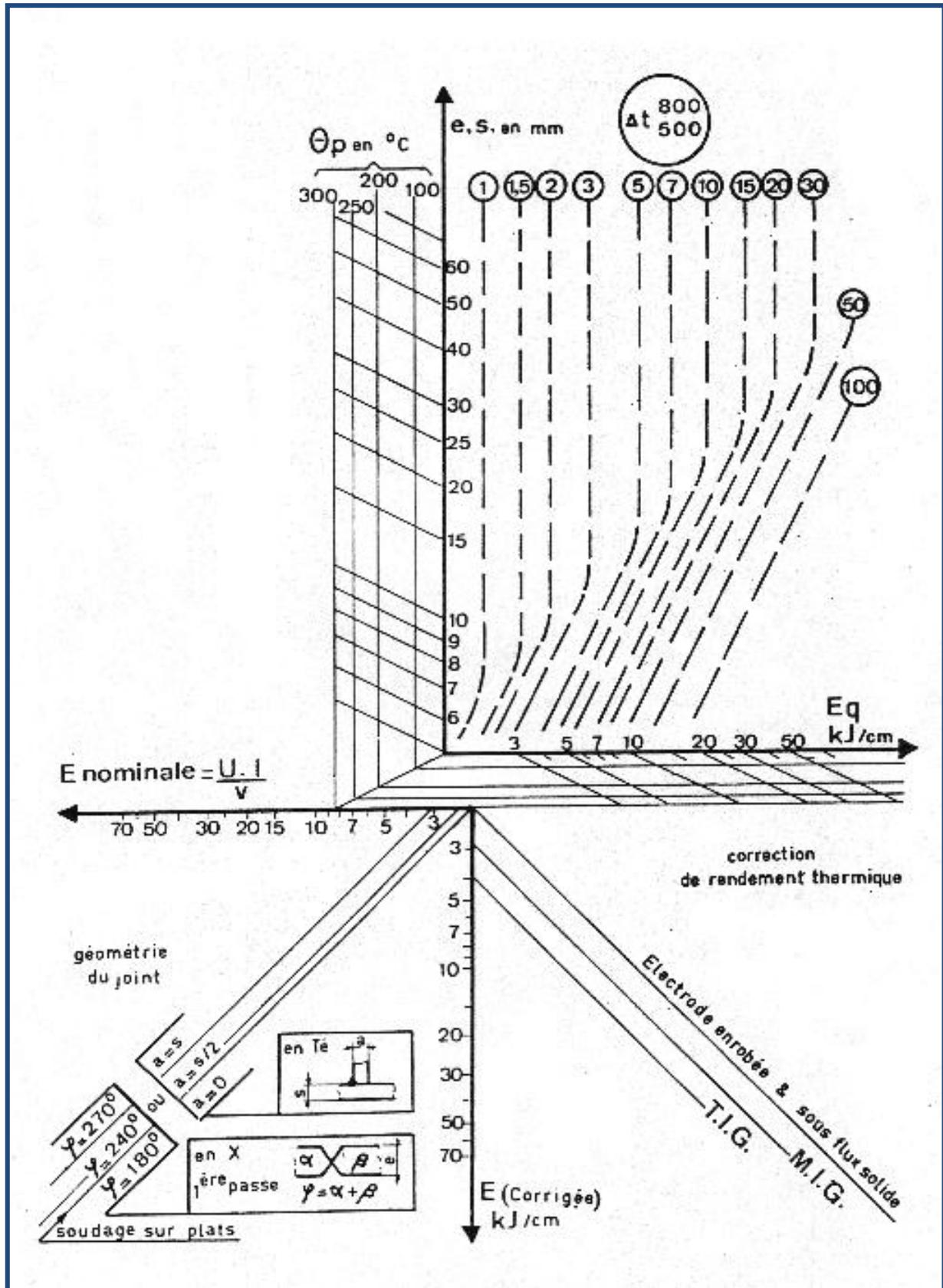
Rm = 533 N/mm ²	Re = 328 N/mm ²	A% = 31.8
----------------------------	----------------------------	-----------

θ en °C

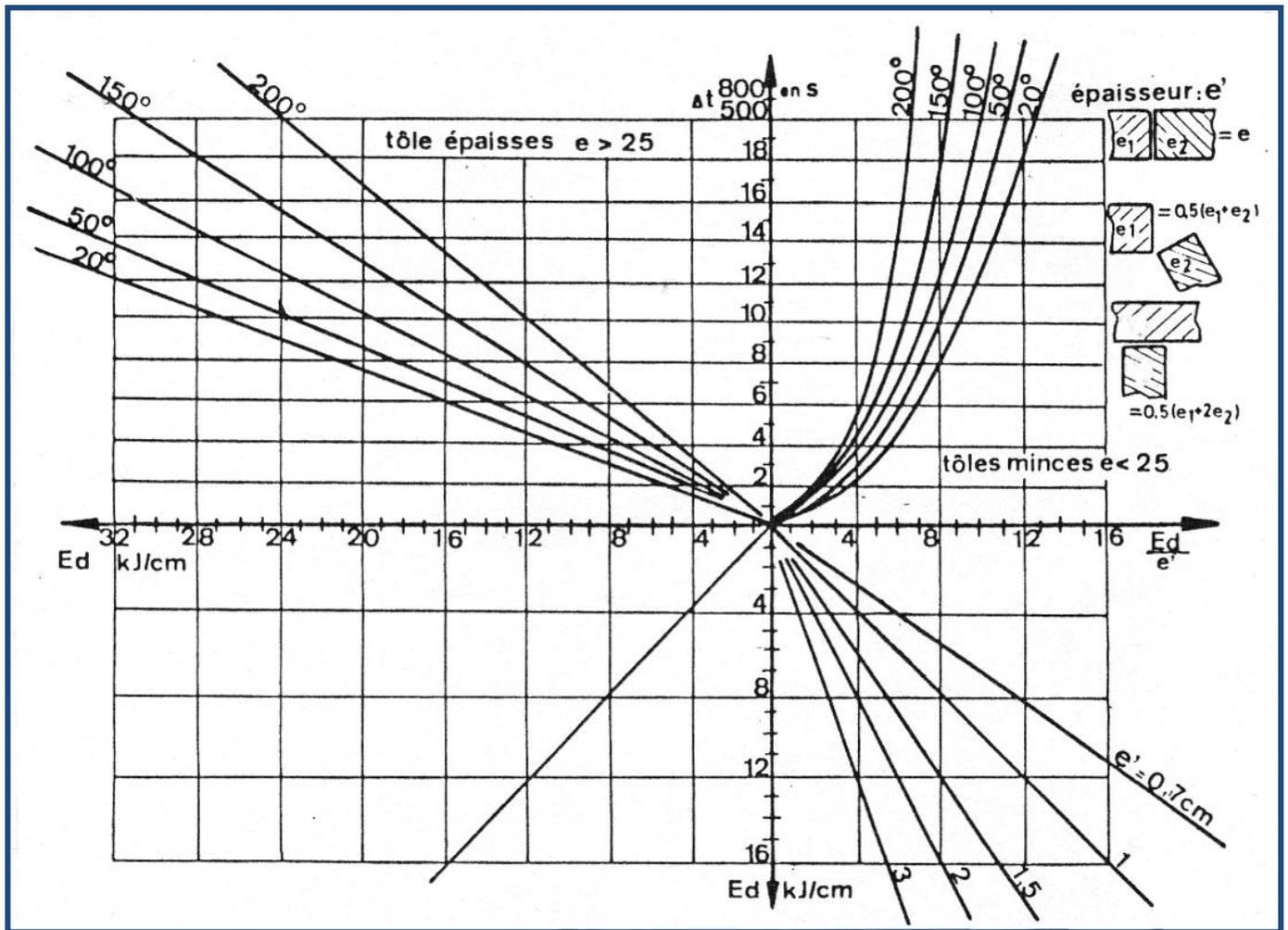
HV5



ABAQUE THERMIQUE GENERAL DE L'IRSID



ABAQUE DE BAUSS ET CHAPEAU



Corrigé en fin de dossier, pages 47- 49

LA FISSURATION

1. FISSURATION A CHAUD

Elle se forme à très haute température lors du refroidissement du bain de fusion.

La solidification de la soudure se fait par la formation de cristaux partant de la zone de liaison vers le centre et la surface de la soudure. Durant cette solidification des contractions importantes tendent à séparer les cristaux (contraintes de retrait).



1.1 ORIGINE DE LA FISSURE A CHAUD

1.1.1 Composition chimique.

Analyse de la composition chimique du métal fondu : **R : Risque de fissuration à chaud.**

$$R = 230 C^* + 190S + 75P + 45Nb - 12.3Si - 1$$

$$C^* = 0.08 \text{ si } C < 0.08 \quad C^* = C \text{ si } C > 0.08$$

La présence de cuivre dans la soudure favorise la fissuration à chaud.

Il faut également prendre en compte le métal d'apport; le taux moyen de dilution de métal de base est de: - 20 à 30 % pour le soudage avec électrodes enrobées, 20 à 40% pour les procédés TIG et MIG.

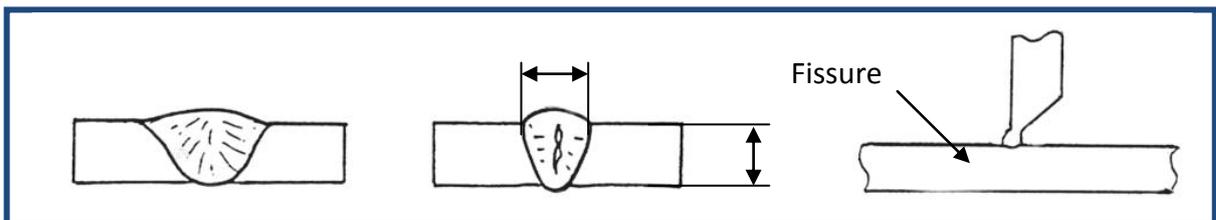
R doit être < 25 pour les soudures bord à bord et R < 19 pour les soudures d'angle.

Exemple pour un acier C35 soudé en angle (composition page 5) avec une électrode SAFER MD 56 dont la composition est : C 0.05 ; Si 0.4 ; Mn 0.9 ; S 0.01 ; P 0.015 ; Ni 0.6 ; Mo 0.3.

$$R = ((230 \times 0.38 + 190 \times 0.015 + 75 \times 0.022 - 12.3 \times 0.27 - 1) \times 30/100) + ((230 \times 0.08 + 190 \times 0.01 + 75 \times 0.015 - 12.3 \times 0.4 - 1) \times 70/100) = 37 \text{ il y a risque de fissuration à}$$

1.1.2 Forme du cordon.

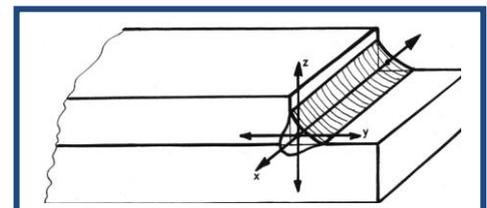
- Maintenir un rapport de largeur du cordon sur sa hauteur ≥ 0.7 ($l/h \geq 0.7$)
- Cordon de forme convexe plutôt que concave.



1.1.3 Contraintes appliquées lors de la solidification.

L'augmentation de l'épaisseur de la tôle et une limite élastique trop élevée favorisent les contraintes.

Des pièces bridées par géométrie de l'assemblage ou maintien en position trop rigide durant le soudage.



X : contraintes longitudinales, Y et Z : contraintes transversales.

1.2 COMMENT EVITER LA FISSURATION A CHAUD

- En prenant en compte les paramètres cités précédemment.
- Un préchauffage et post-chauffage homogènes des pièces diminuent les contraintes.

2. FISSURATION A FROID

Elle se forme à une température inférieure à 200° C et peut également apparaître plusieurs jours après soudage.

Elle se rencontre dans la zone affectée thermiquement et plus rarement dans la zone fondue.

Elle est très fine et peut être sous cordon, c'est pourquoi elle est redoutée.

2.1 ORIGINE DE LA FISSURE A FROID

- Présence d'une soudure peu ductile (trempe)
- Présence de contraintes
- Présence d'hydrogène

2.1.1 PRESENCE D'UNE SOUDURE PEU DUCTILE (MARTENSITE OU BAINITE).

La présence de martensite est liée à la trempabilité du métal.

Teneur en carbone du métal déposé : $\geq 0.25 \%$

Teneur en élément d'alliages : Mn – Cr – Mo ...

Cycle de refroidissement rapide.

Energie nominale faible

Epaisseur du métal forte



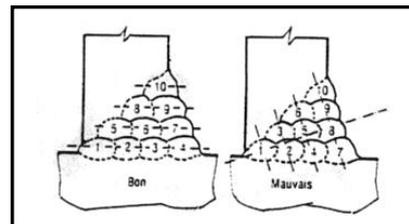
2.1.2 PRESENCE DE CONTRAINTES OU DE TENSIONS RESIDUELLES.

Elles se développent au niveau du joint durant le refroidissement.

Elles sont occasionnées par la dilatation localisée du métal due aux différences de température d'un point à l'autre éloigné du cordon.

Elles dépendent :

- Des propriétés mécaniques du métal de base et du métal fondu.
- De la forme du joint.
- Des séquences de soudage.
- Du bridage.
- Du poids des pièces.



Répartition des passes pour éviter l'arrachement

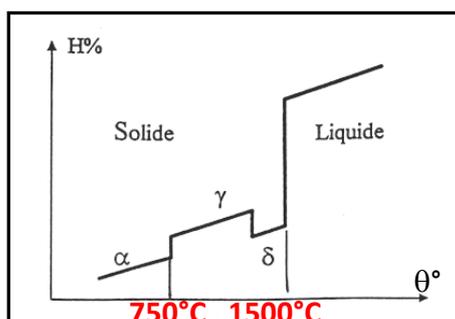
Les contraintes sont au maximum égales à la limite élastique (R_e) du métal de base ou du métal fondu.

2.1.3 PRESENCE D'HYDROGENE.

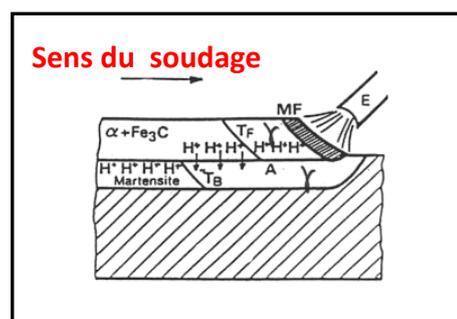
Elle est due à l'humidité contenue dans les enrobages ou les flux des produits d'apport.

L'hydrogène tend à s'échapper vers l'extérieur, ce processus de diffusion se produit d'autant plus rapidement que la température est élevée, d'où l'intérêt du post- chauffage.

La présence : de calamine, d'oxyde, de graisse, d'eau à la surface des pièces à souder est une source importante d'hydrogène.



Solubilité de l'hydrogène



Diffusion de l'hydrogène

A EXPLICATION DE LA SOLUBILITE DE L'HYDROGENE :

Sous l'effet des hautes températures de l'arc, l'hydrogène passe en solution dans le métal fondu qui en est avide à l'état liquide.

La courbe ci-avant nous montre que la solubilité de l'hydrogène dans le fer décroît avec la température. Donc l'hydrogène ne se dissout que lorsqu'il y a fusion ensuite il se diffuse.

Au cours du soudage lorsque intervient la transformation du **métal fondu** dans le domaine perlitique ou bainitique, l'hydrogène (très diffusible) tend alors à traverser la zone de liaison pour entrer dans l'austénite non encore transformée de la ZAT. Cette ZAT subit alors une transformation martensitique qui piège cet hydrogène dans la ZAT.

Tous les procédés ne sont pas égaux face à la quantité d'hydrogène dissous.

Si nous comparons la quantité d'hydrogène dissout nous obtenons :

Electrodes rutil forte dissolution ; Soudage sous flux et électrodes basiques dissolution moyenne ; TIG, MIG, MAG (fil plein) faible dissolution.

B REMEDES :

1. Maîtriser les conditions de soudage (pas de martensite) : Energie de soudage élevée. Préchauffage et postchauffage. Température entre passes.

2. Diminuer les contraintes internes et externes : Limiter le bridage. Déterminer avec soin le cycle de soudage.

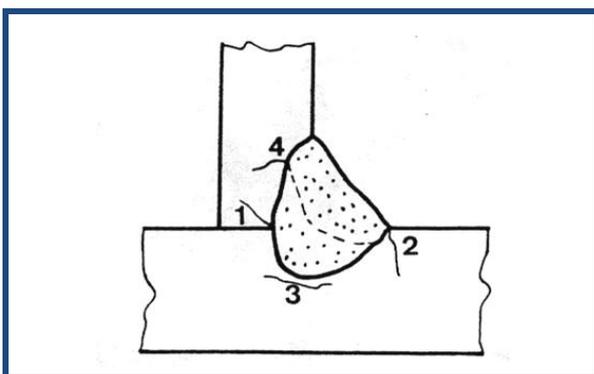
3. Minimiser la quantité d'hydrogène : Etuvage. Produit à bas hydrogène (basique). Post chauffage pour permettre l'évacuation de dégazage de la soudure). Nettoyer les pièces.

C ETUDE DES COURBES DE FISSURATION A FROID :

Les courbes de fissuration représentées en coordonnées contrainte temps de refroidissement (ou énergie de soudage) doivent être lues, en relation avec les TRCS correspondantes. Toutes les TRCS n'ont pas de courbe de fissuration à froid.

D LES DIFFERENTES SORTES DE FISSURE :

La figure ci-dessous illustre les différentes formes de fissures que l'on rencontre dans la ZAT. C'est surtout lors de la première passe (passe de fond) que naissent les risques de fissuration.



- 1. Fissure à la racine**
- 2. Fissure au raccordement**
- 3. Fissure sous cordon**
- 4. Fissure au raccordement entre deux passes**

E CONTRAINTES, PRECHAUFFAGE ET POST-CHAUFFAGE :

Les contraintes résiduelles du soudage, lors d'un bridage important (du à la masse de la pièce ou au bridage de celle-ci) sont au plus égales à la limite élastique la plus faible.

Il est à noter que la température de préchauffage est égale à la température de post-chauffage.

Contraintes maxi Re le plus petit des deux matériaux, elles dépassent rarement 2/3 Re, dans un assemblage normal on prend Re / 3.

2.2.1 METHODE DE DETERMINATION DES RISQUES DE FISSURATION (METHODE DES IMPLANTS).

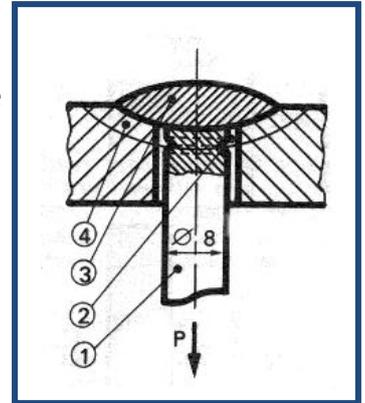
Cet essai consiste à entailler **2** un petit cylindre **1** que l'on place dans un trou de diamètre identique percé dans le métal de base. Un cordon de soudure **3** est déposé sur l'assemblage. Une contrainte prédéterminée est appliquée durant le refroidissement et maintenue pendant 24 heures.

On augmente l'effort de contraintes sur le cylindre jusqu'à fissuration qui se produit dans la ZAT **4**.

On étudie l'influence de la vitesse de refroidissement et l'influence de la quantité d'hydrogène introduite par le soudage.

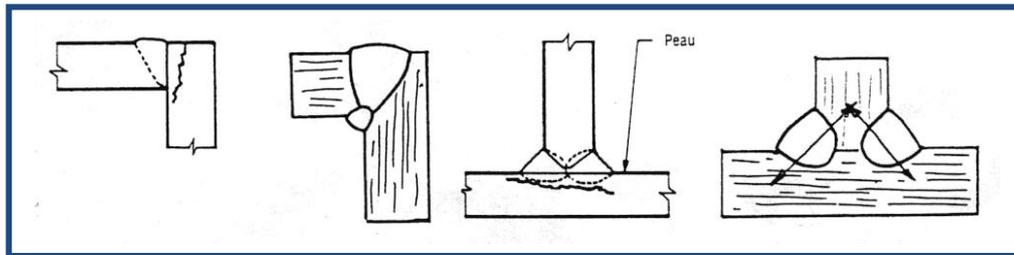
L'essai de fissuration sur implants montre que la tension est très faible pour une structure complètement martensitique, mais augmente rapidement dès que la structure bainitique apparaît.

Cette méthode permet de tracer des courbes de fissuration.



3. ARRACHEMENT LAMELLAIRE

Phénomène provenant uniquement du métal de base (inclusions alignées dans le sens du laminage). Fissuration en ZAT parallèle à la peau des produits laminés.



3.1 ORIGINE

Inclusions dans le métal de base.

Contraintes perpendiculaires à la peau.

3.2 COMMENT EVITER L'ARRACHEMENT LAMELLAIRE

Voir la géométrie du joint avant soudage.

Limiter les contraintes perpendiculaires à la peau.

Optimiser la procédure de soudage. Séquence de soudage. Beurrage etc...

Choisir des aciers à caractéristiques garanties dans le sens travers court.

4. POROSITES

Ce sont des petites bulles de gaz qui n'ont pu se dégager lorsque le bain de fusion était liquide (Flocons).

4.1 ORIGINE

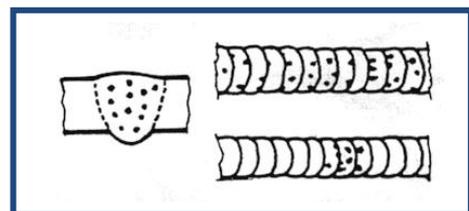
Dégagement :

D'hydrogène.

D'azote.

De CO.

De gaz sulfureux SO₂.



4.2 COMMENT EVITER LES POROSITES

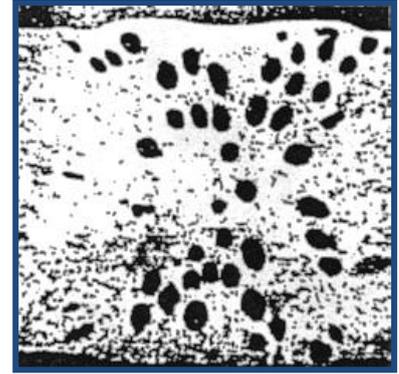
Souder sur des pièces propres : Non humides, exemptes de rouille, non grasses, exemptes de calamine.

Le S et P ne doivent pas excéder 0.07 %.

Utiliser des produits d'apport désoxydants contenant du silicium, de l'aluminium.

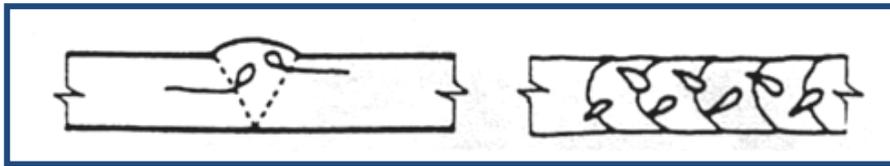
Utiliser une énergie de soudage moyenne :

- Energie trop faible = Bain trop froid.
- Energie trop forte = La quantité de gaz dans le bain de fusion augmente très rapidement.



5 SOUFFLURES VERMICULAIRES

Elles sont provoquées par un dégagement gazeux, elles partent de la partie basse du cordon de soudure en se dirigeant vers le haut.

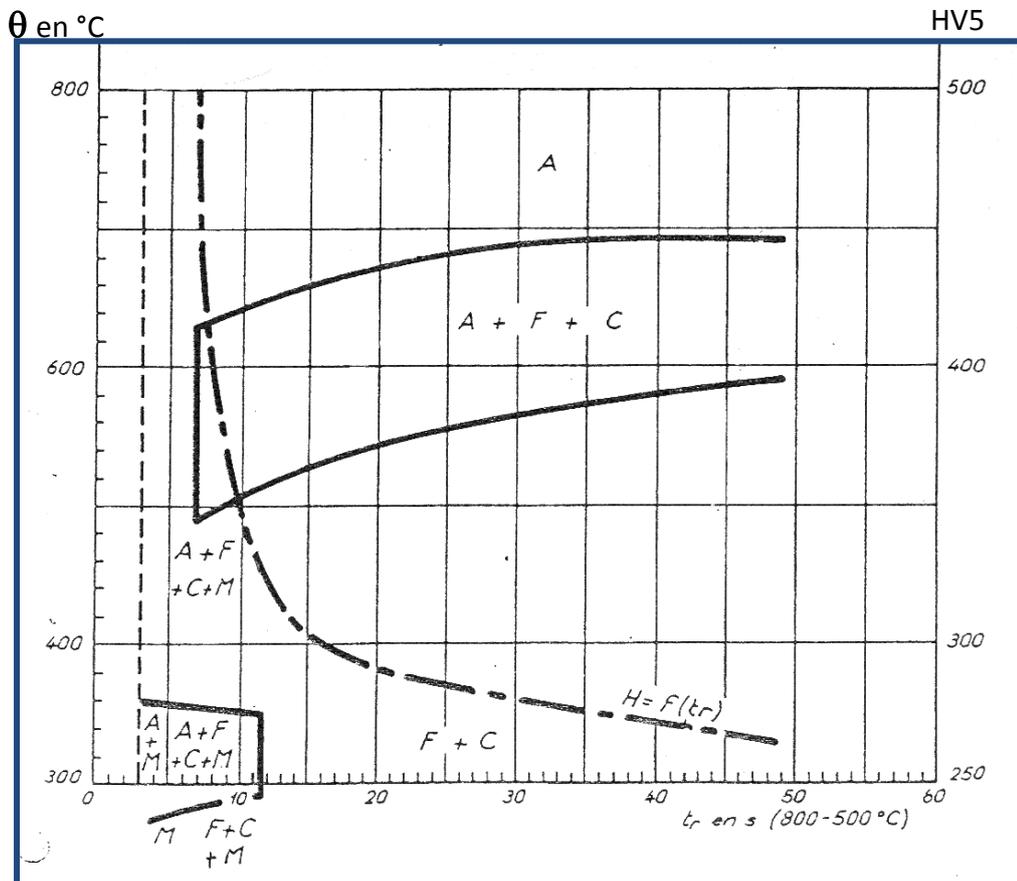


TRCS DU C35 OU XC38

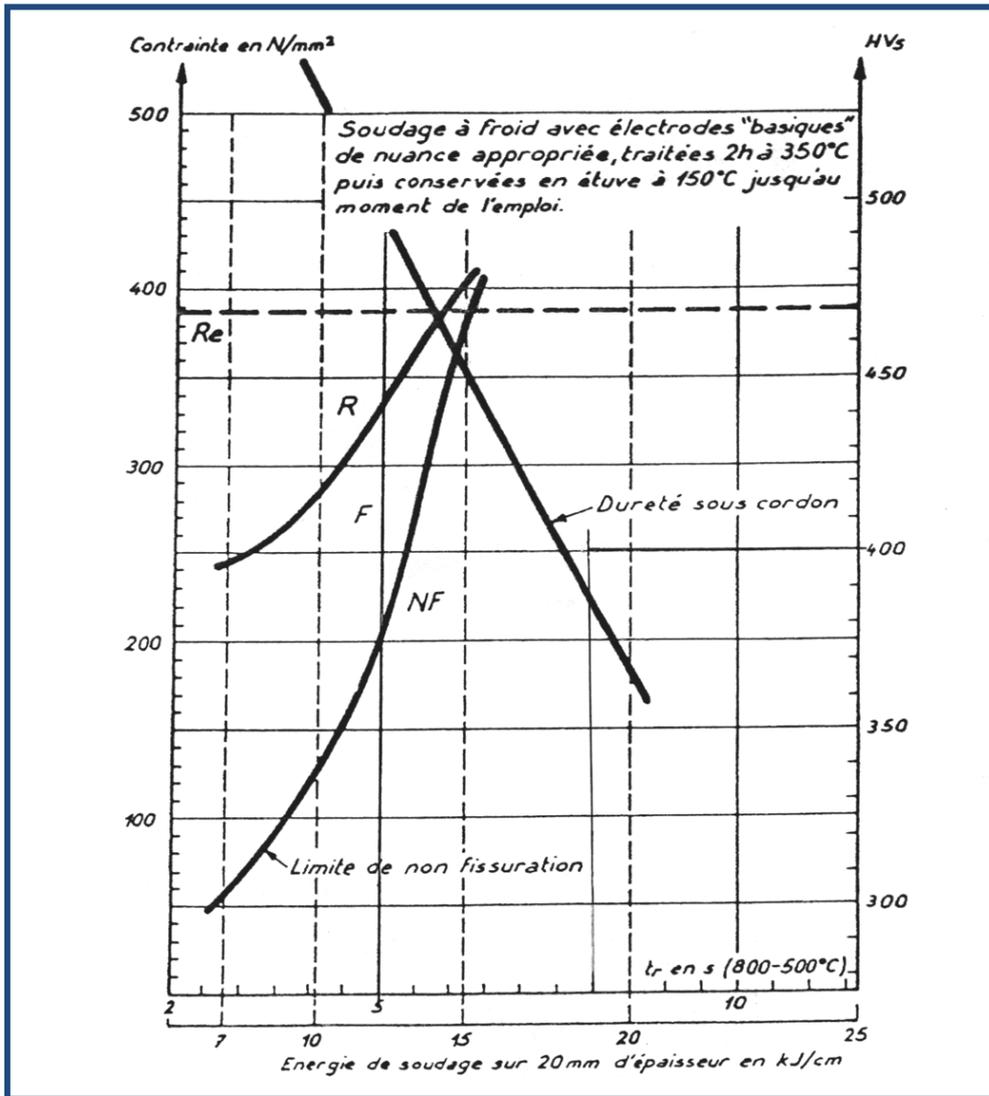
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P
0.38	0.63	0.27	0.05	0.05	0.14	0.02	0.015	0.022

Caractéristiques de traction :

$R_m = 603 \text{ N/mm}^2$ $Re = 388 \text{ N/mm}^2$ $A\% = 29$

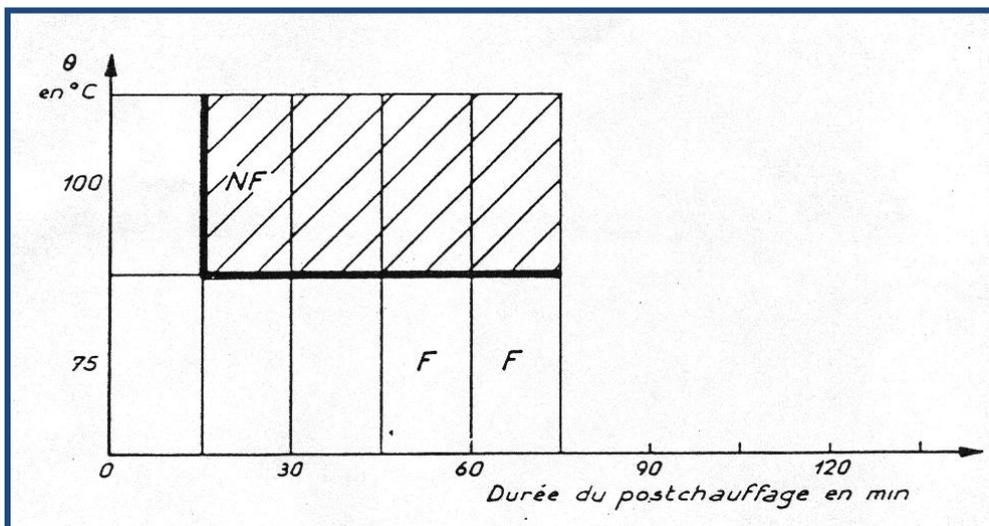


COURBE DE FISSURATION A FROID DU C35 OU XC 38



CONDITIONS DE PRE ET POSCHAUFFAGE

Soudage avec électrode basique traitée 2h à 350 °C. Conditions limites pour éviter la fissuration :
 Contrainte 400 N/mm^2 , énergie 12 kJ/cm, épaisseur 20 mm.



APPLICATION N° 1 FISSURATION A FROID

DONNEES TECHNIQUES :

On se propose d'étudier l'assemblage des repères 101 et 102 suivant le plan de la roue à auges. Cette soudure est réalisée à l'arc électrique à l'électrode enrobée basique.

L'assemblage sera effectué en deux passes. La première, électrode Ø 3.15, $E_n = 14$ kJ/cm et la deuxième, électrode Ø 5, $E_n = 20$ kJ/cm. Contrainte maxi admissible : $300 \text{ N/mm}^2 (< Re \text{ du S355})$.

TRAVAIL DEMANDE :

Quelle sera la vitesse de refroidissement. Donnez la structure et la dureté dans la ZAT pour cette vitesse. Pour trouver les valeurs demandées, on utilisera la courbe TRCS ainsi que l'abaque de l'IRSID.

Avez vous fissuration, si oui, quelle est la solution envisagée. Comparez avec la dureté critique $H_{Vc} = 350$ (H_{Vc} pour le S 355).

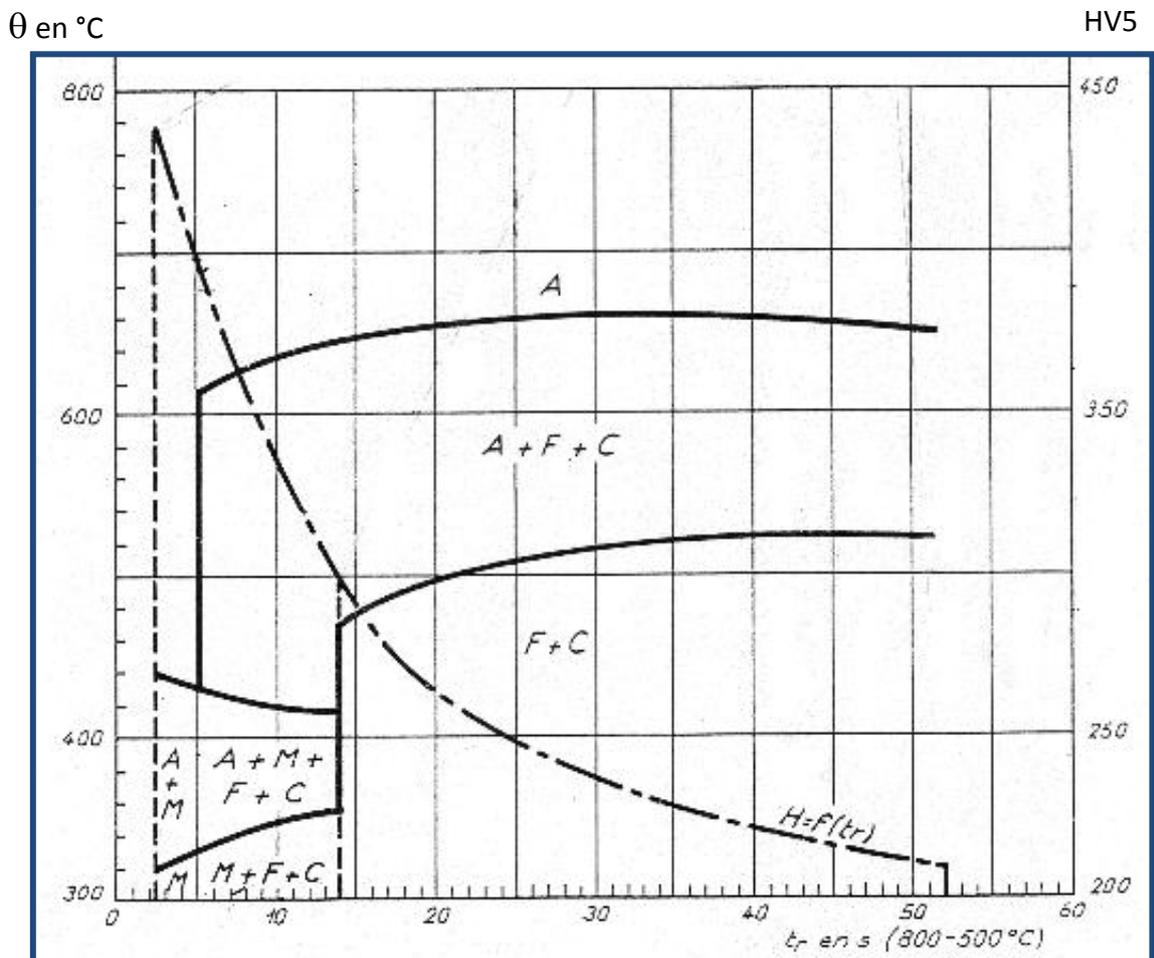
DIAGRAMME TRCS DU S 355 OU E 36

ANALYSE CHIMIQUE DU MATERIAU :

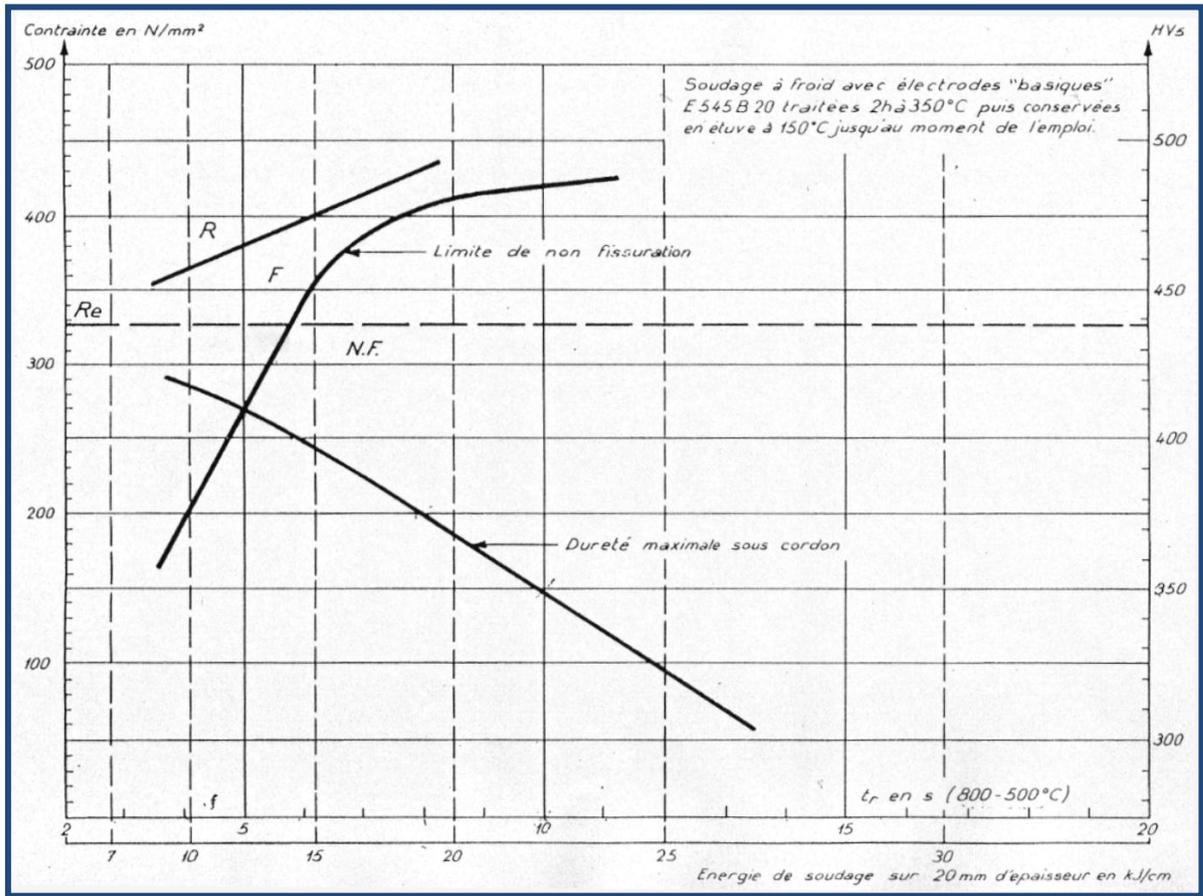
	C	Mn	Si	Al	S	P
S355 JO	0.17	1.4	0.45	0.063	0.026	0.027

CARACTERISTIQUES DE TRACTION :

Rm = 533 N/mm²	Re = 328 N/mm²	A% = 31.8
----------------------------------	----------------------------------	------------------



COURBE DE FISSURATION A FROID DU S355 OU E 36



TRCS DU C35 OU XC38

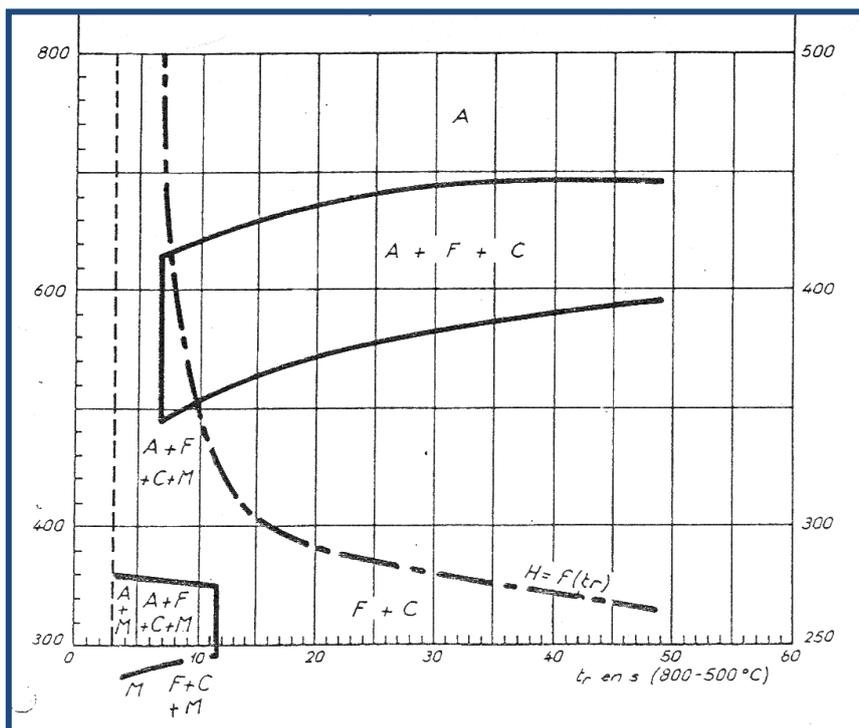
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P
0.38	0.63	0.27	0.05	0.05	0.14	0.02	0.015	0.022

Caractéristiques de traction :

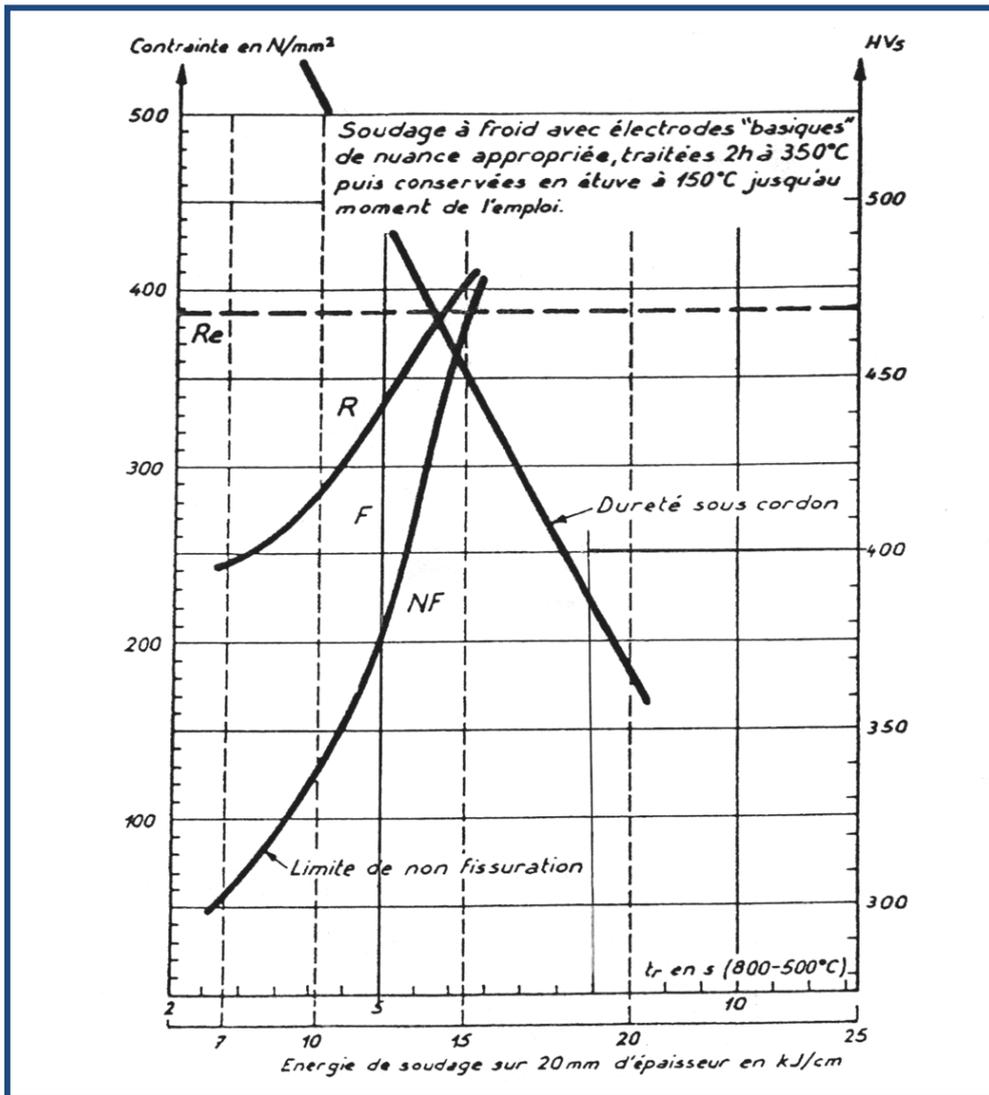
$R_m = 603 N/mm^2$ $R_e = 388 N/mm^2$ $A\% = 29$

θ en °C

HV5

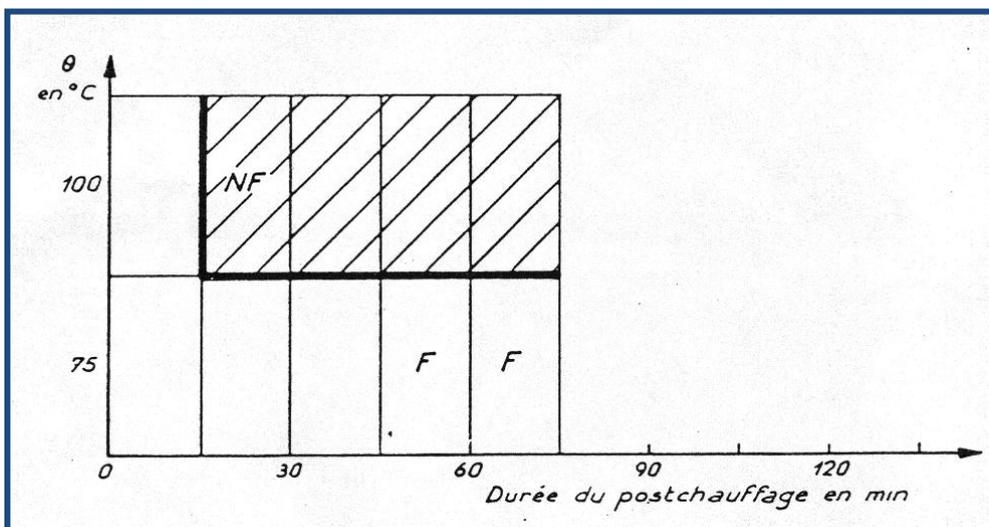


COURBE DE FISSURATION A FROID DU C35 OU XC 38

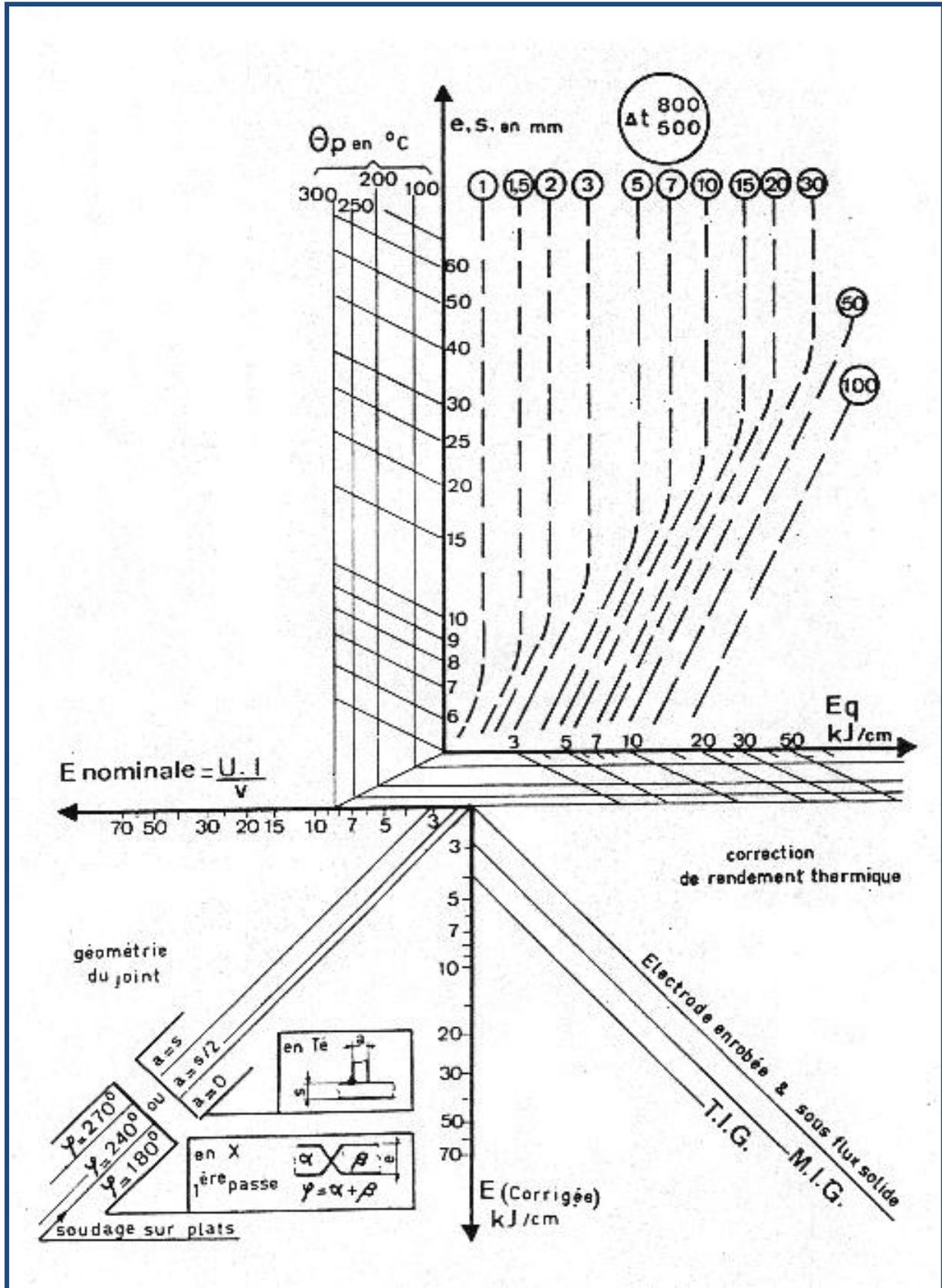


CONDITIONS DE PRE ET POSCHAUFFAGE

Soudage avec électrode basique traitée 2h à 350 °C. Conditions limites pour éviter la fissuration :
 Contrainte 400 N/mm^2 , énergie 12 kJ/cm, épaisseur 20 mm.



ABAQUE THERMIQUE GENERAL DE L'IRSID



Corrigé en fin de dossier, pages 51-55

CORRIGE METHODE SEFERIAN, APPLICATION 4 (PAGE 22)

$$\text{Calcul du Céq} = 0.1 + (0.5+2.06)9 + 0.23/18 + (7 \times 0.91)/90$$

$$\text{Céq} = 0.47$$

$$\text{Calcul du Céq C} = 0.468 \times (1+0.005 \times 15) = 0.503$$

$$\text{Calcul du préchauffage : } T_p = 350 \sqrt{0.503-0.25} = 176^\circ\text{C}$$

$$\text{Utilisation de l'abaque : } 0.47 \text{ se situe à } 7 \times 20.5/10 = 14.35\text{mm}$$

$$50^\circ\text{C} - 23\text{mm}$$

$$T_p - 83$$

$$T_p = 83 \times 50/23 = 180^\circ\text{C}$$

Nous obtenons une $T_p = 150^\circ\text{C}$ avec BWRA et $T_p = 180^\circ\text{C}$ avec SEFERIAN, des résultats sensiblement égaux pour ce cas, ce qui n'est pas obligatoire car les paramètres ne sont pas les mêmes.

Le pouvoir trempant donne la soudabilité de l'acier grâce au Céq.

Le pouvoir trempant peut être comparé à un synonyme du Céq.

Le pouvoir trempant n'est là que pour vérifier s'il y a un risque dans la ZAT (trempe).

CORRECTION

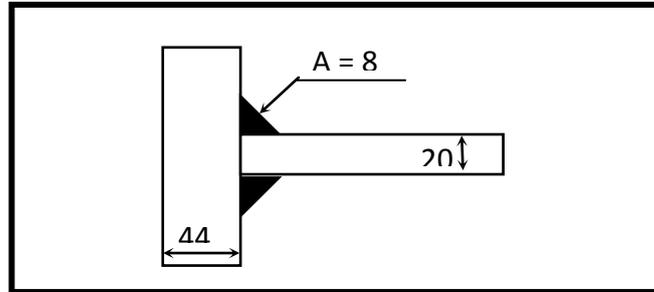
DE L'APPLICATION N° 1 SEFERIAN – BWRA (PAGE 24)

1. Longueur de la soudure :

$$D \text{ ext.} \times \pi \times 2 = 200 \times 3.14 \times 2 = 1256.6 \text{ mm} \quad \text{soudage des 2 cotés}$$

2. Schéma de l'assemblage

La soudure se fait avant l'usinage ce qui justifie l'épaisseur de 44 mm.



3. Désignation des aciers :

S 355 : Acier non allié de construction dont la limite élastique est de 355 N/ mm².

C 35 : Acier non allié, chimiquement défini, pour traitement thermique et dont le % de carbone est de 0.35 %.

4. Etude de la soudabilité :

Nous utiliserons pour le cas présent la méthode IIS.

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

$$C_{\text{EC}} = C_{\text{éq}} + 0.0254 \times E$$

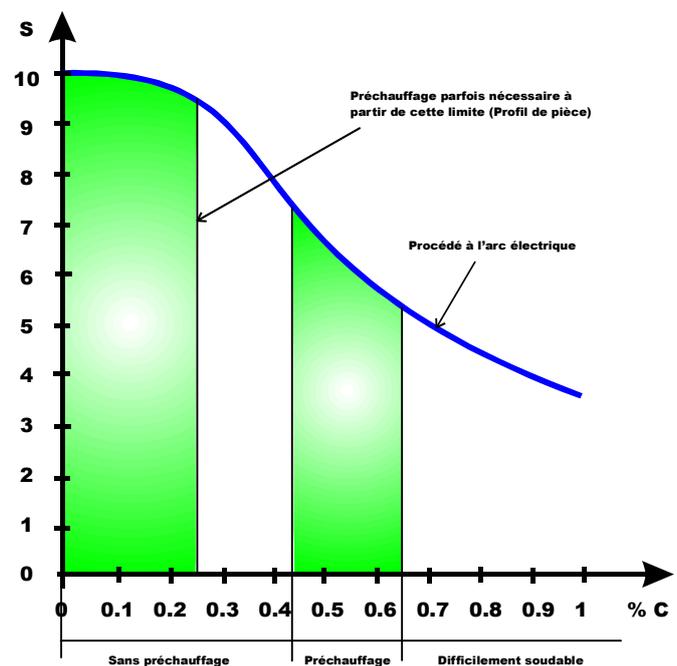
$$C_{\text{éq}} \text{ S355} = 0.17 + 1.4/6 = 0.403$$

$$C_{\text{EC}} \text{ S355} = 0.403 + 0.0254 \times 20 = 0.91$$

Acier difficilement soudable

$$C_{\text{éq}} \text{ C35} = 0.35 + 0.63/6 + (0.05+0.14)/5 + (0.02+0.05)/15 = 0.498$$

$$C_{\text{EC}} \text{ C35} = 0.498 + 0.0254 \times 44 = 1.61$$



Conclusion :

$[C] = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$				indices de
Electrodes rutiles		Electrodes basiques		soudabilité
jusqu'à [C] = 0,20		jusqu'à [C] = 0,25		A
--- 0,21 à 0,23		--- 0,26 à 0,30		B
--- 0,24 à 0,27		--- 0,31 à 0,35		C
--- 0,28 à 0,32		--- 0,36 à 0,40		D
--- 0,33 à 0,38		--- 0,41 à 0,45		E
--- 0,39 à 0,45		--- 0,46 à 0,50		F
--- > 0,45		--- > 0,50		G

Pour Ceq C 35 = 0.403 => l'indice de soudabilité est D.

Température de préchauffage :

Chiffre de sévérité thermique	Indice de soudabilité	Température minimum à laquelle doit être effectuée la soudure				
		Diamètre des électrodes en millimètres				
		3.2	4	5	6	8
		(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)
T.S.N. 2	D	0				
	E	50	0			
	F	125	25			
T.S.N. 3	C	0				
	D	75	0			
	E	100	25	0		
T.S.N. 4	F	150	100	25		
	C	50				
	D	100	25			
T.S.N. 6	E	125	75	0		
	F	175	125	75	0	
	B	50				
T.S.N. 8	C	100	25			
	D	150	100	25		
	E	175	125	75	0	
T.S.N. 12	F	225	175	125	75	0
	A	25				
	B	75	25			
T.S.N. 16	C	125	75	25		
	D	150	125	75	0	
	E	200	175	125	75	0
T.S.N. 24	F	225	200	175	100	50
	A	75	25	0		
	B	125	75	50	0	
T.S.N. 16	C	175	150	125	50	25
	D	200	175	175	125	50
	E	225	200	200	150	100
T.S.N. 24	F	250	250	225	200	150
	A	75	25	0		
	B	125	75	50	25	
T.S.N. 24	C	175	150	125	75	25
	D	200	175	175	125	100
	E	225	200	200	175	150
T.S.N. 24	F	250	250	225	200	200

Conclusion :

La température recommandée est de 175°.

5. Nécessité du préchauffage avec la méthode SEFERIAN :

Nous n'étudierons que le cas du C 35 car il a un $C_{eq.} > C_{eq. S 355}$.

CARBONE EQUIVALENT SUIVANT EXPRESSION DE SEFERIAN

$$C_{eq.} = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 Mo}{90}$$

$$C_{eq. C 35} = 0.35 + \frac{0.63 + 0.05}{9} + \frac{0.05}{18} + \frac{7 \times 0.14}{90} = 0.439$$

CARBONE EQUIVALENT COMPENSE :

$$C_{eq.C} = C_{eq.} (1 + 0.005 e)$$

$$C_{eq.C C 35} = 0.439 [[1 + 0.005 [((44 \times 2) + 20) / 3]]] = 0.518$$

Température de préchauffage :

$$T_p = 350 \sqrt{C_{eq.C}} - 0.25$$

$$T_p = 350 \sqrt{0.52} - 0.25 = 181.8^\circ$$

Conclusion : Les deux méthodes donnent des résultats similaires. Le préchauffage sert à faire refroidir la soudure plus lentement donc plus de trempe.

CORRIGE APPLICATION N° 1 FISSURATION A FROID (PAGE 42)

DONNEES TECHNIQUES :

On se propose d'étudier l'assemblage des repères 101 et 102 suivant le plan de la roue à auges. Cette soudure est réalisée à l'arc électrique à l'électrode enrobée basique.

L'assemblage sera effectué en deux passes. La première, électrode \varnothing 3.15, $E_n = 14$ kJ/cm et la deuxième, électrode \varnothing 5, $E_n = 20$ kJ/cm. Contrainte maxi admissible : $300 \text{ N/mm}^2 (< Re \text{ du S355})$.

TRAVAIL DEMANDE :

1. Quelle sera la vitesse de refroidissement. Donnez la structure et la dureté dans la ZAT pour cette vitesse. Pour trouver les valeurs demandées, on utilisera la courbe TRCS ainsi que l'abaque de l'IRSID.
2. Avez-vous fissuration, si oui, quelle est la solution envisagée. Comparez avec la dureté critique $H_{Vc} = 350$ (H_{Vc} pour le S 355).

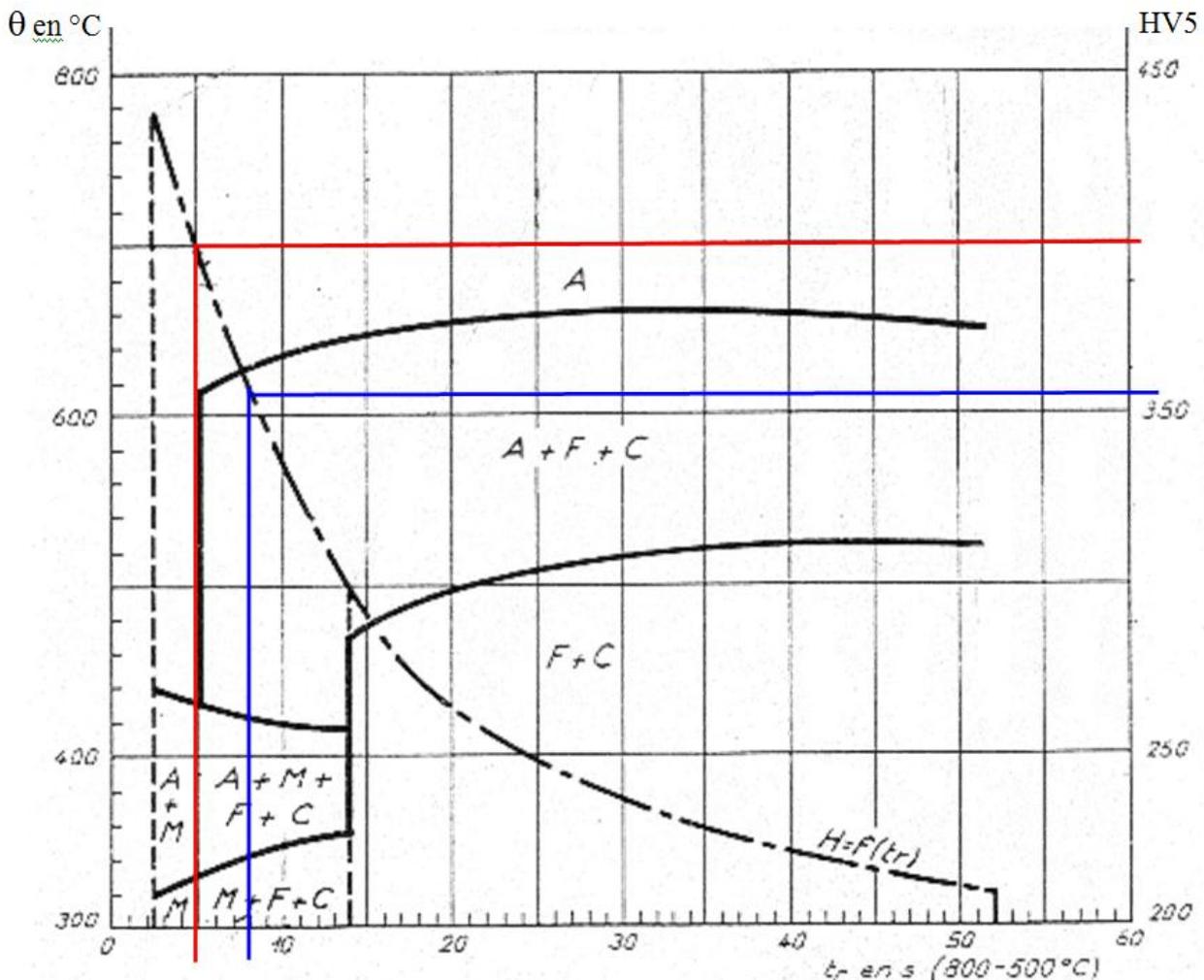
DIAGRAMME TRCS DU S 355 OU E 36

Analyse chimique du matériau :

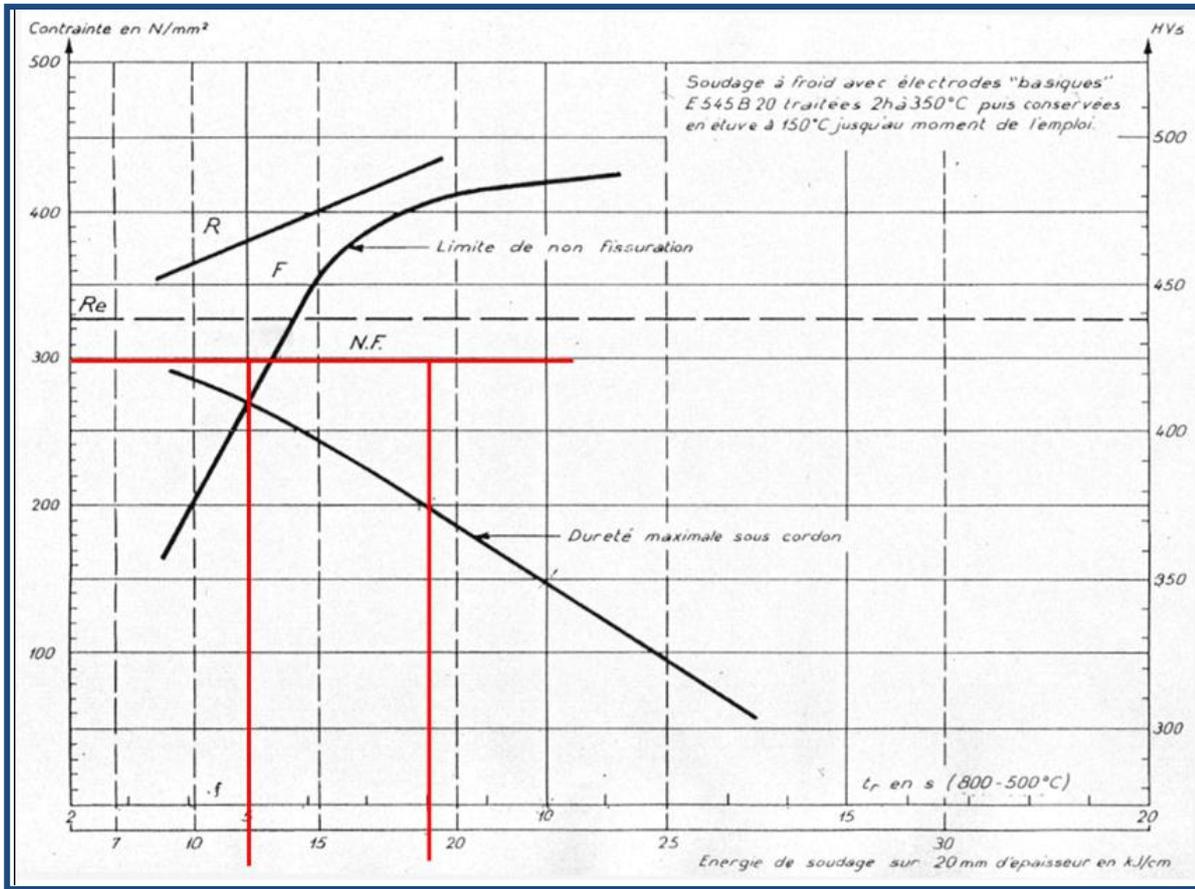
	C	Mn	Si	Al	S	P
S355 JO	0.17	1.4	0.45	0.063	0.026	0.027

Caractéristiques de traction :

$R_m = 533 \text{ N/mm}^2$	$Re = 328 \text{ N/mm}^2$	$A\% = 31.8$
--	---	--------------------------------



COURBE DE FISSURATION A FROID DU S355 OU E 36

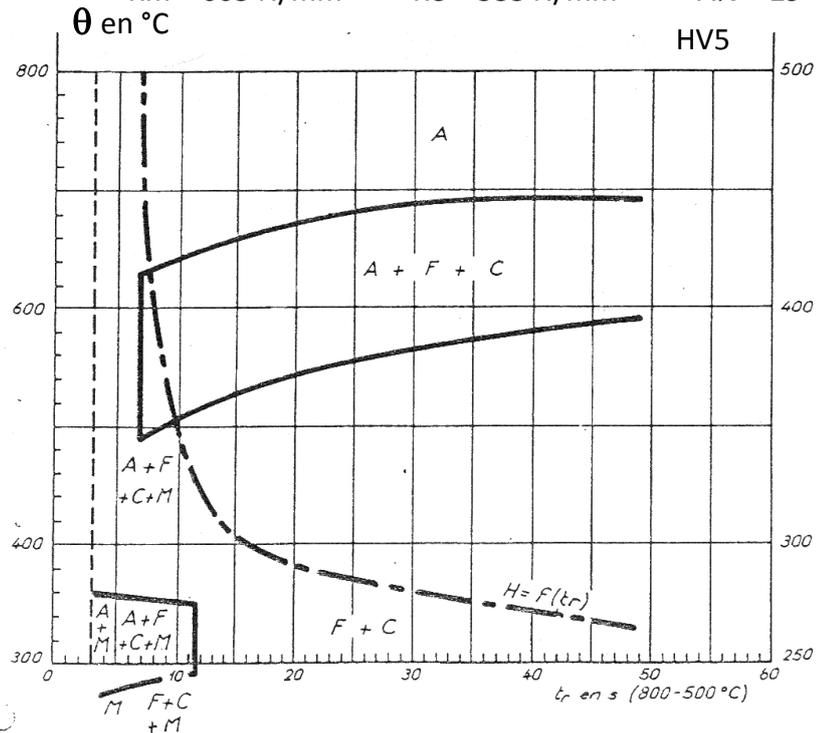


TRCS DU C35 OU XC38

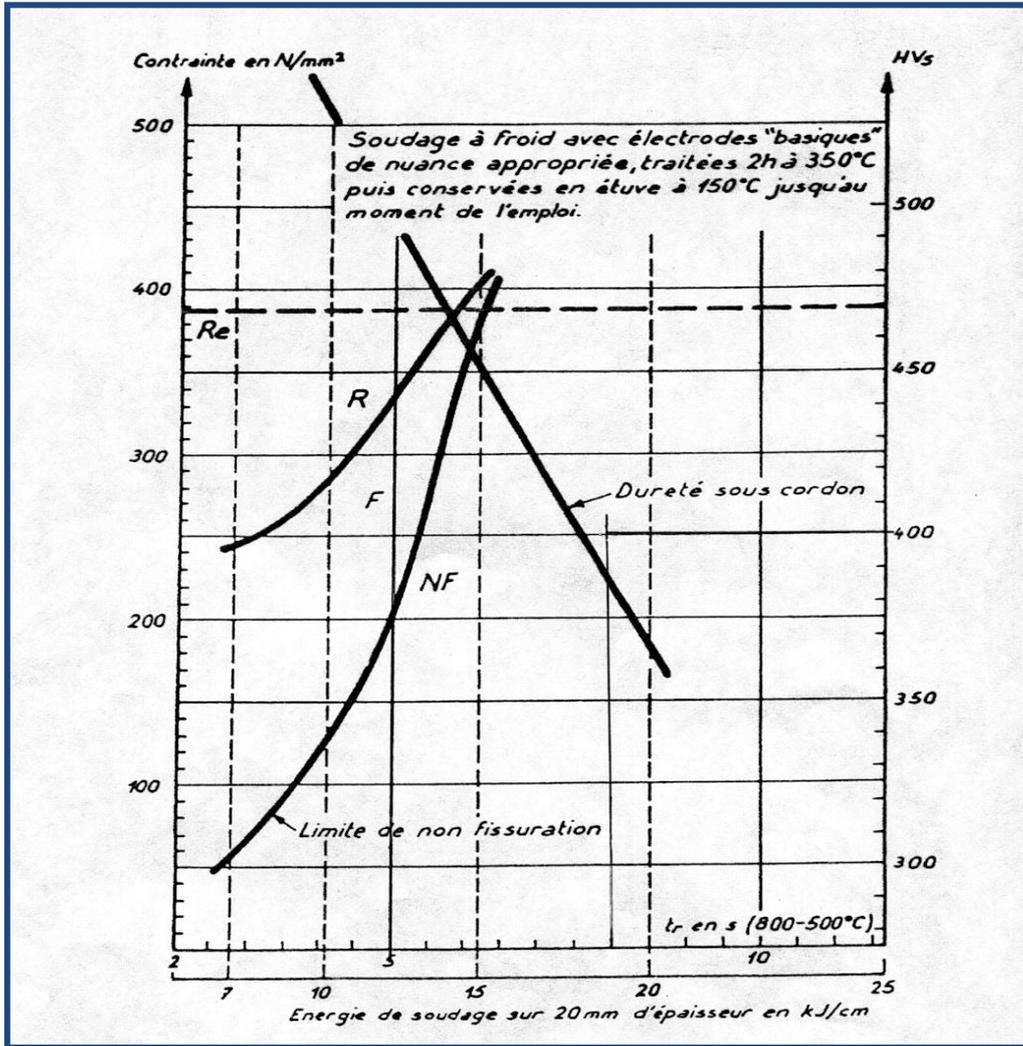
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P
0.38	0.63	0.27	0.05	0.05	0.14	0.02	0.015	0.022

Caractéristiques de traction :

$R_m = 603 N/mm^2$ $R_e = 388 N/mm^2$ $A\% = 29$

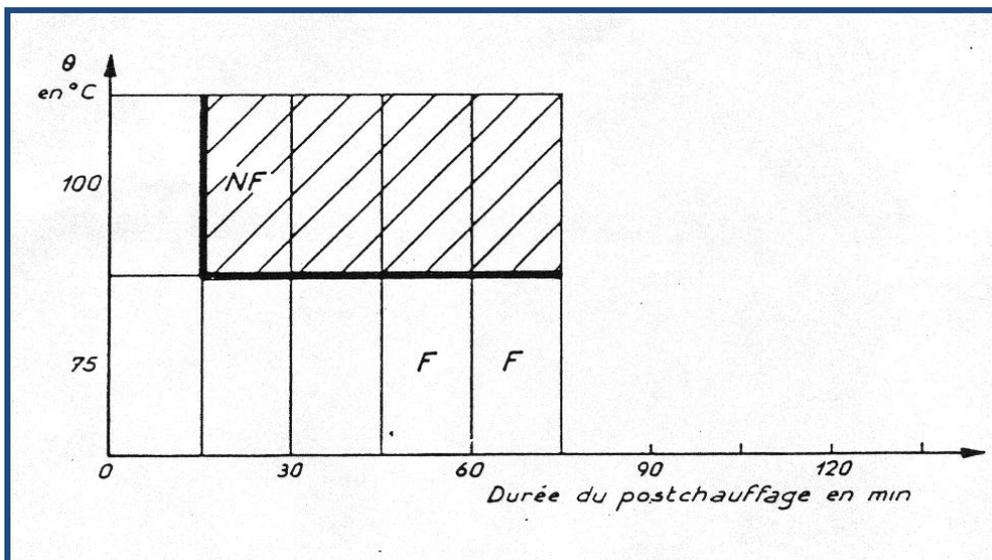


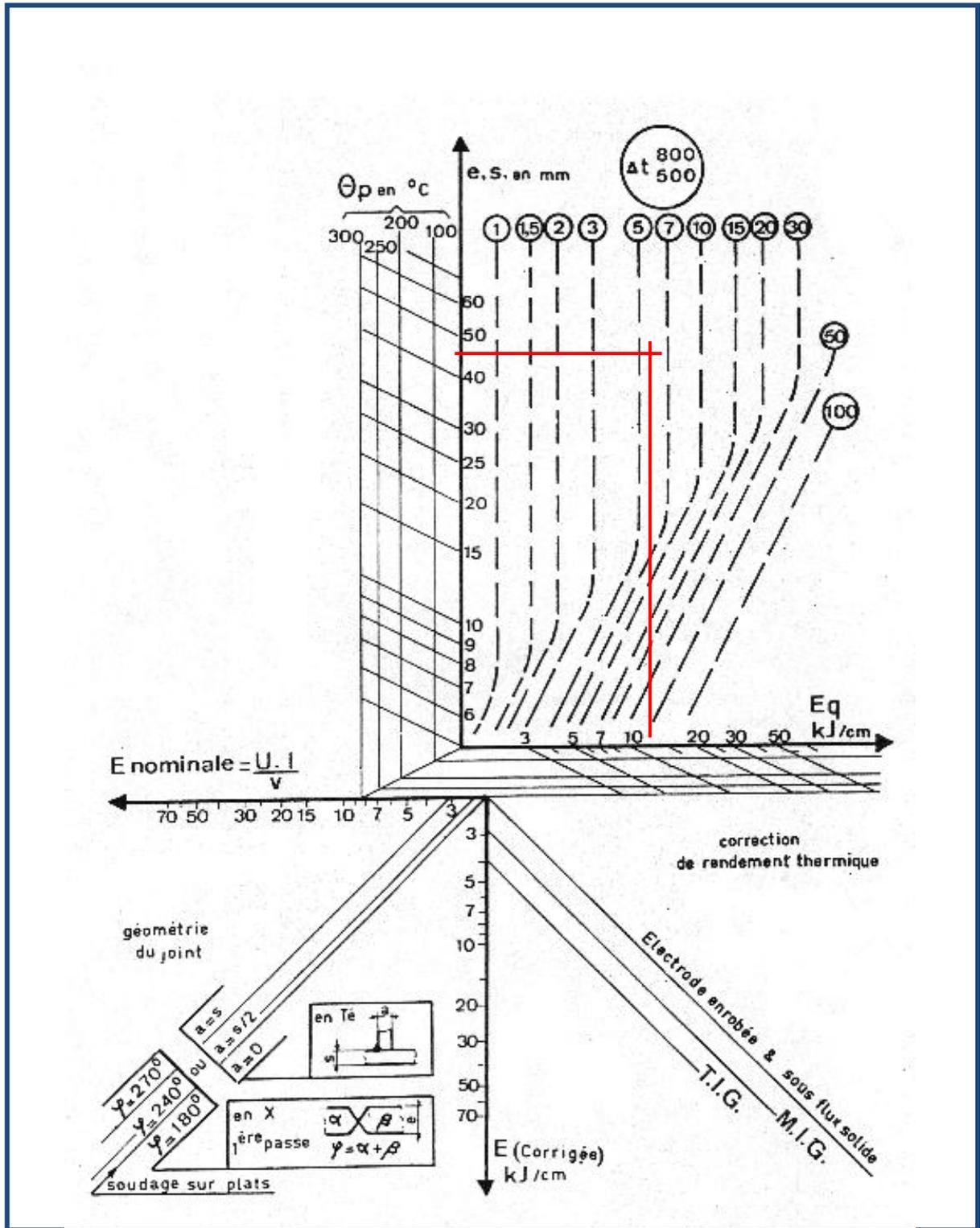
COURBE DE FISSURATION A FROID DU C35 OU XC 38



CONDITIONS DE PRE ET POSCHAUFFAGE

Soudage avec électrode basique traitée 2h à 350 °C. Conditions limites pour éviter la fissuration :
 Contrainte 400 N/mm^2 , énergie 12 kJ/cm, épaisseur 20 mm.





QUESTION N°1 IRSID ET TRCS :

L'épaisseur à prendre en compte est l'épaisseur s de la semelle ici $s = 44$

- Electrode $\varnothing 3.15$, $E_n = 14 \text{ kJ}/\text{cm}$

Calcul de k ; $a / s = 20 / 44 = 0.5$ donc $k = 0.89$ on utilisera la droite $a = s / 2$. Pour un soudage 111, $\eta = 1$

Calcul de E_c et de E_q ; $E_c = E_n \times k = 14 \times 0.89 = 12.46 \text{ kJ}/\text{cm}$ $E_q = E_c \times \eta = 12.46 \text{ kJ}/\text{cm}$

Grâce à l'IRSID on détermine la vitesse de refroidissement $\Delta t_{500}^{800} = 5.5 \text{ s}$

- Electrode $\varnothing 5$, $E_n = 20 \text{ kJ/cm}$

Calcul de E_c et de E_q ; $E_c = E_n \times k = 20 \times 0.89 = 17.8 \text{ kJ/cm}$, $E_q = E_c \times \eta = 17.8 \text{ kJ/cm}$

Grâce à l'IRSID on détermine la vitesse de refroidissement $\Delta t_{500}^{800} = 8 \text{ s}$

S 355 $\varnothing 3.15$ structure dans la ZAT (5s) : limite Martensite Bainite, dureté : 400 V

S 355 $\varnothing 5$ structure dans la ZAT (8s) : Bainitique, dureté : 355 V

C 35 $\varnothing 3.15$ structure dans la ZAT (5s) : Martensitique , dureté > 500 V

C 35 $\varnothing 5$ structure dans la ZAT (8s) : Bainitique, dureté : 400 V

QUESTION N°2 COURBES DE FISSURATION :

On prendra en compte la vitesse de refroidissement et non l'énergie de soudage car l'épaisseur de la semelle n'est pas 20 mm comme stipulé sur la courbe de fissuration mais 44 mm.

S 355 $\varnothing 3.15$, Δt : 5s, $\sigma_{\text{Maxi}} = 300 \text{ N/mm}^2$, F zone de fissuration.

S 355 $\varnothing 5$, Δt : 8s, $\sigma_{\text{Maxi}} = 300 \text{ N/mm}^2$, NF zone de non fissuration.

C 35 $\varnothing 3.15$, Δt : 5s, $\sigma_{\text{Maxi}} = 300 \text{ N/mm}^2$, F zone de fissuration.

C 35 $\varnothing 5$, Δt : 8s, $\sigma_{\text{Maxi}} = 300 \text{ N/mm}^2$, NF zone de non fissuration.

La fissuration n'a lieu que lors de la première passe ($\varnothing 3.15$, Δt : 5s). A l'aide des courbes de fissuration, on détermine la vitesse de refroidissement mini pour sortir de ce risque tout en gardant notre contrainte $\sigma_{\text{Maxi}} = 300 \text{ N/mm}^2$.

S 355 $\varnothing 3.15$, Δt : 5s, on prendra 7s.

C 35 $\varnothing 3.15$, Δt : 5s, on prendra 7s.

La solution envisagée est un préchauffage, il est calculé à l'aide de l'abaque de l'IRSID. Pour ce cas la température de préchauffage est de 100°C.

Il faut maintenant tenir compte d'un éventuel poschauffage en exploitant le tableau page 3 (il n'existe pas toujours).

Pour le C 35 un postchauffage de 100°C et d'une durée de 15 mn mini est obligatoire (température de postchauffage = température de préchauffage).

Si l'on compare avec la dureté HVc. Pour une dureté critique HVc = 350, la norme EN 288-3 nous oblige à faire un préchauffage plus sévère Δt mini C 35 = 10s la température de préchauffage = 250°C et une température entre passe de 100°C (pas besoin de postchauffage d'après le tableau).

Conclusion : La norme EN 288-3 qui nous oblige à respecter une dureté maxi HVc, couvre également les risques de fissuration à froid. Donc pas besoin, si on respecte la norme, d'aller jusqu'à la fissuration à froid sauf cas exceptionnel de fabrication.