



Préfabrication Viaduc de Millau - Atelier EFFEL à Lauterbourg -



1. Les procédés
2. Base de choix des procédés
3. Les produits d'apports
4. Défectologie
5. Fissuration à froid
6. Réglementation
7. Les contrôles
 - Tôles et profilés
 - Qualification des modes opératoires de soudage
 - Qualification des soudeurs
 - Contrôles non destructifs

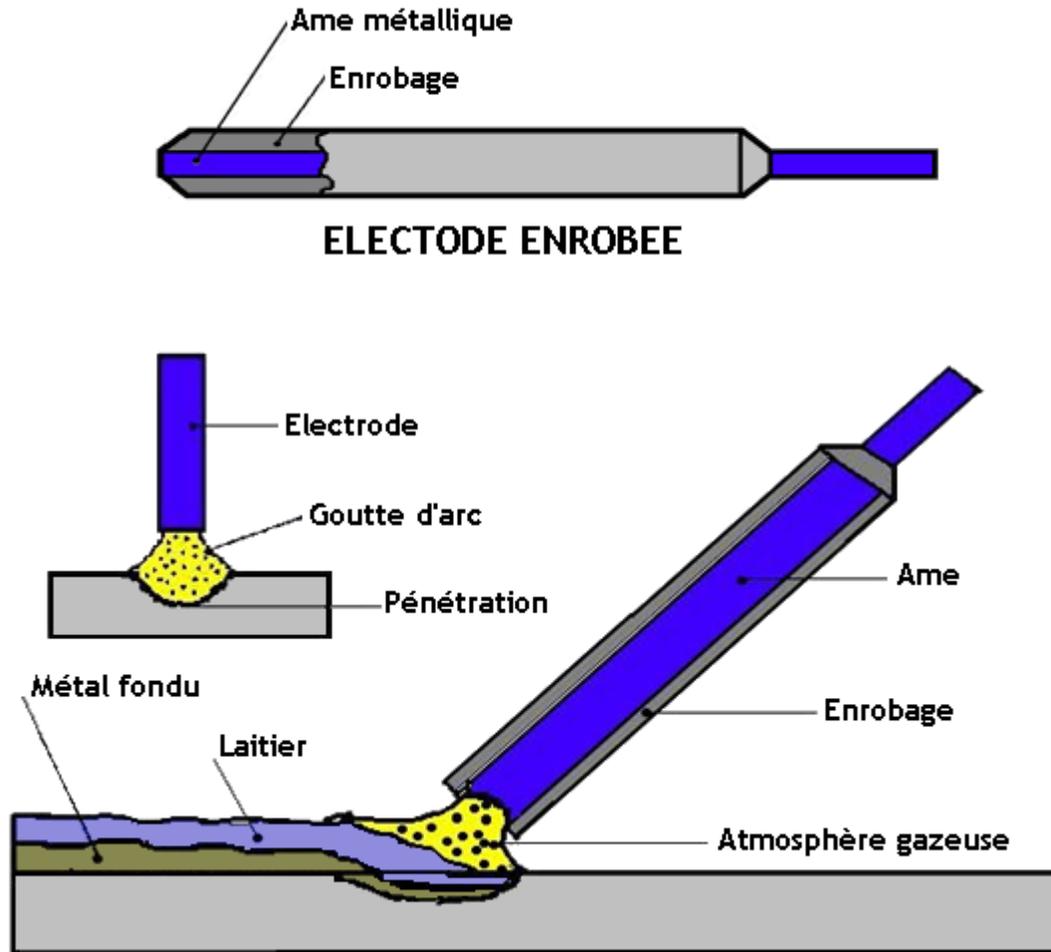


1- Les procédés

- Le soudage manuel à l'électrode enrobée (SMAW)
- Le soudage MAG avec fil massif (GMAW)
- Le soudage MAG avec fil fourré (FCAW)
- Le soudage sous flux en poudre (SAW)
- Le soudage à l'arc des goujons (stud welding)



Le soudage manuel à l'électrode enrobée (SMAW)





Le soudage manuel à l'électrode enrobée (SMAW)

Electrode de type basique => meilleures propriétés mécaniques.

Choix d'électrodes aptes à produire un métal fondu de résistance supérieure à celui du métal de base et des résiliences garanties à - 20° C ou -50° C.

Avantage du procédé

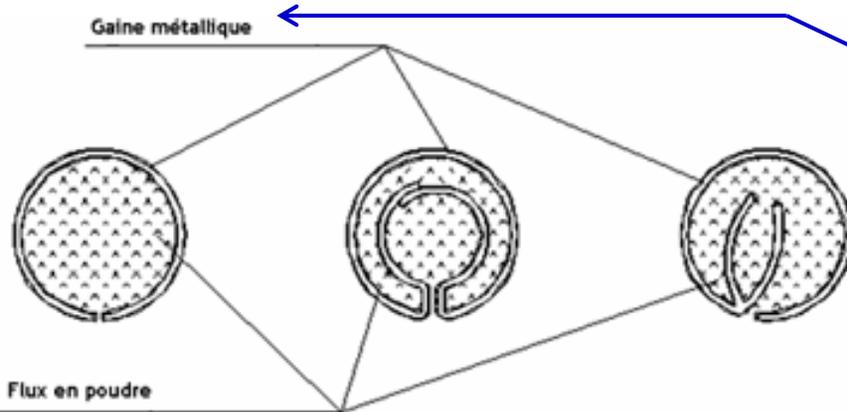
- ✓ Facilité de mise en œuvre toutes positions
- ✓ Utilisation en atelier et à l'extérieur
- ✓ Excellente qualité des soudures (enrobage basique)

Inconvénient

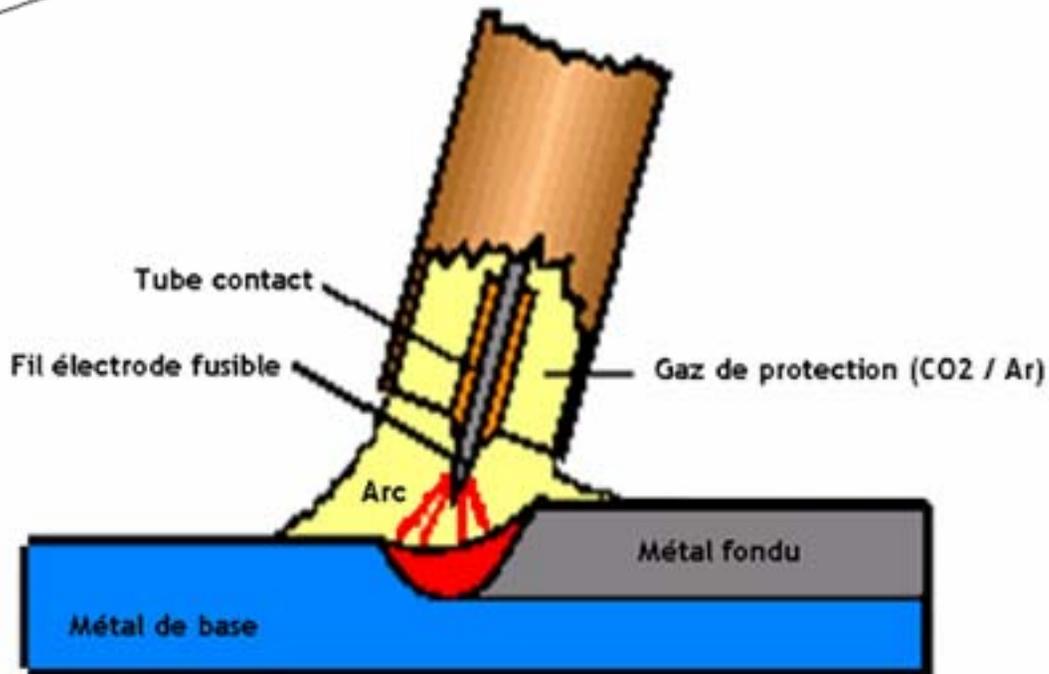
- ✓ Faible taux de dépôt (ordre du kg/h)



Le soudage MAG (Metal Activ Gas)

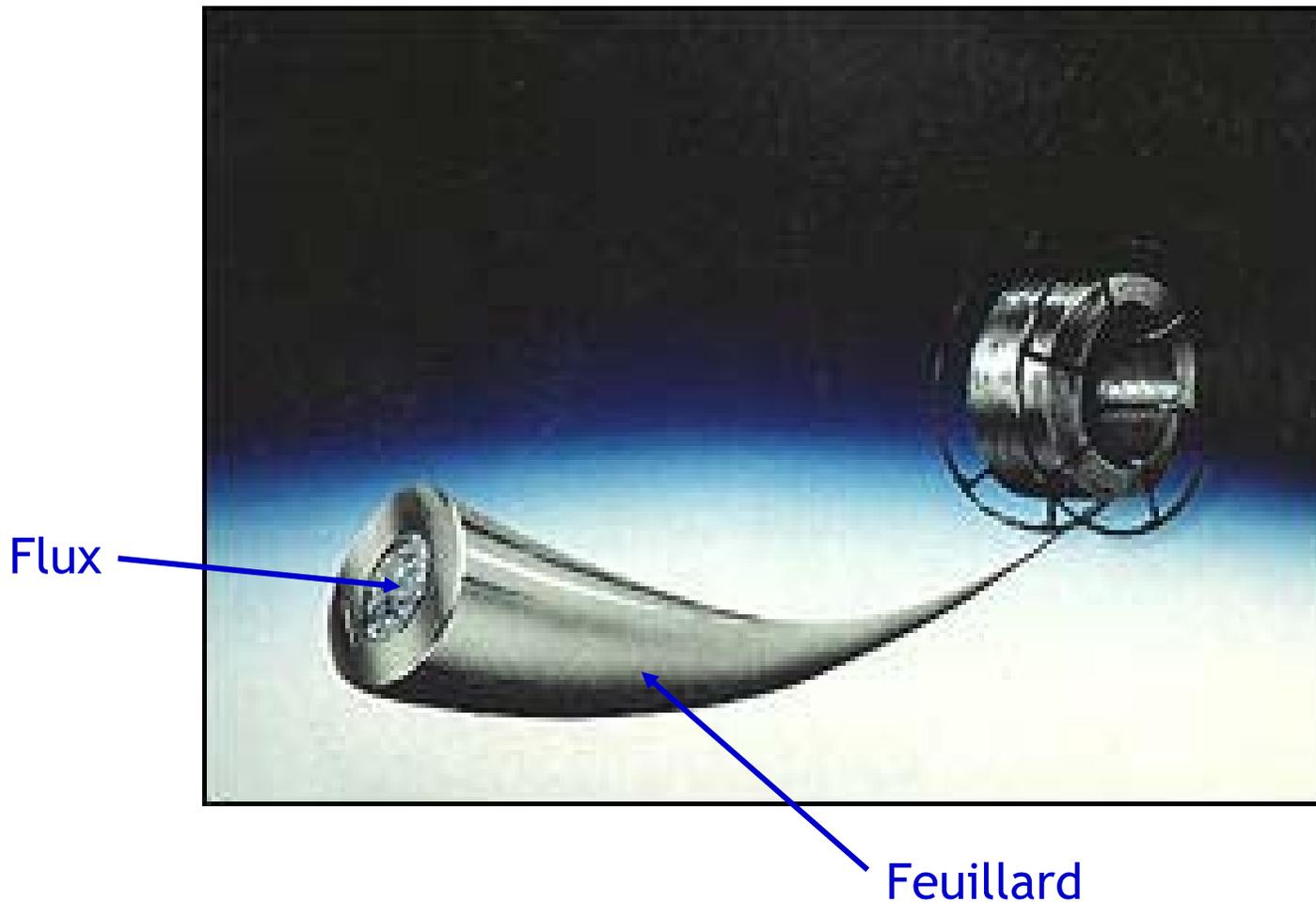


- ✓ Avec fil massif (GMAW)
- ✓ Avec fil fourré, ou avec fil fourré sans gas (FCAW)





Produit d'apport fil fourré





MAG (Metal Activ Gas)

Avantages

- ✓ Robotisation possible
- ✓ Rendement > électrode enrobée
- ✓ Position à plat ou verticale montante

Inconvénients

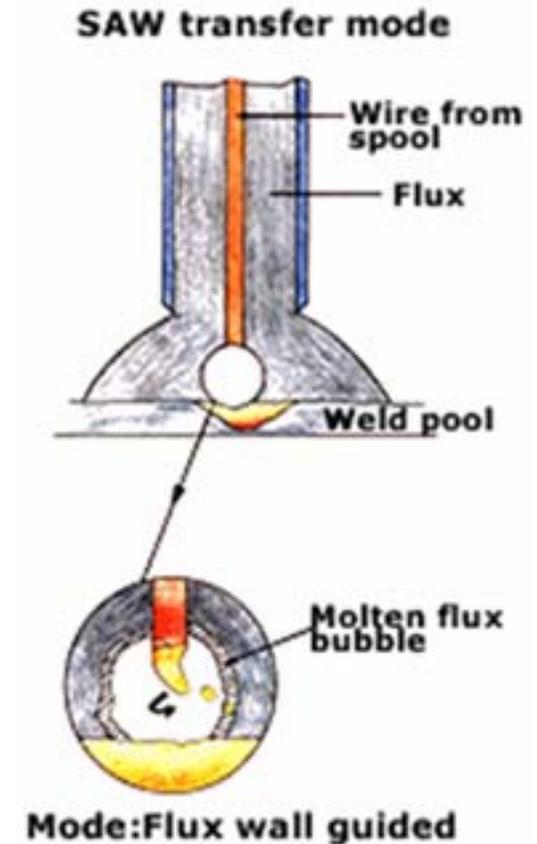
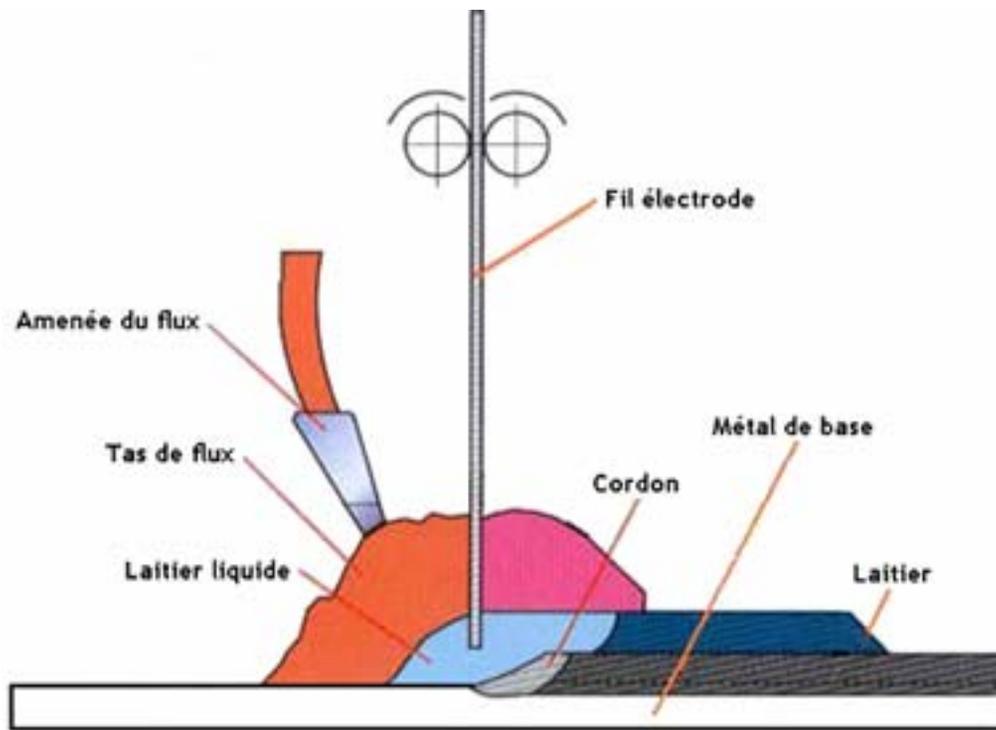
- ✓ Qualité insuffisante (résilience) pour les soudures bout à bout multipasses
- ✓ Risque de collage
- ✓ Protection CO₂/argon (travail en plein air déconseillé)

Fils fourrés sans gas (FCAW) contre MAG

- ✓ Taux de dépôt supérieur (densité de courant supérieure possible) et risque de collage inférieur.
- ✓ Meilleures propriétés mécaniques dues à une meilleure maîtrise de la chimie du métal fondu grâce à l'optimisation des éléments ajoutés dans le flux.
- ✓ Soudage en extérieur.



Le soudage sous flux en poudre (SAW)



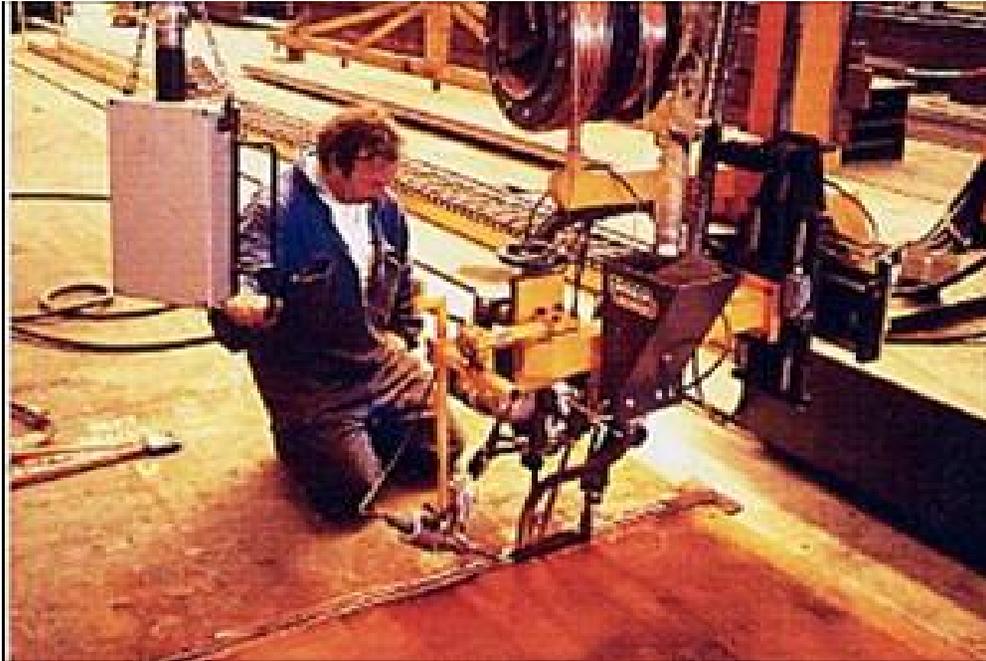


Le soudage sous flux en poudre(SAW)

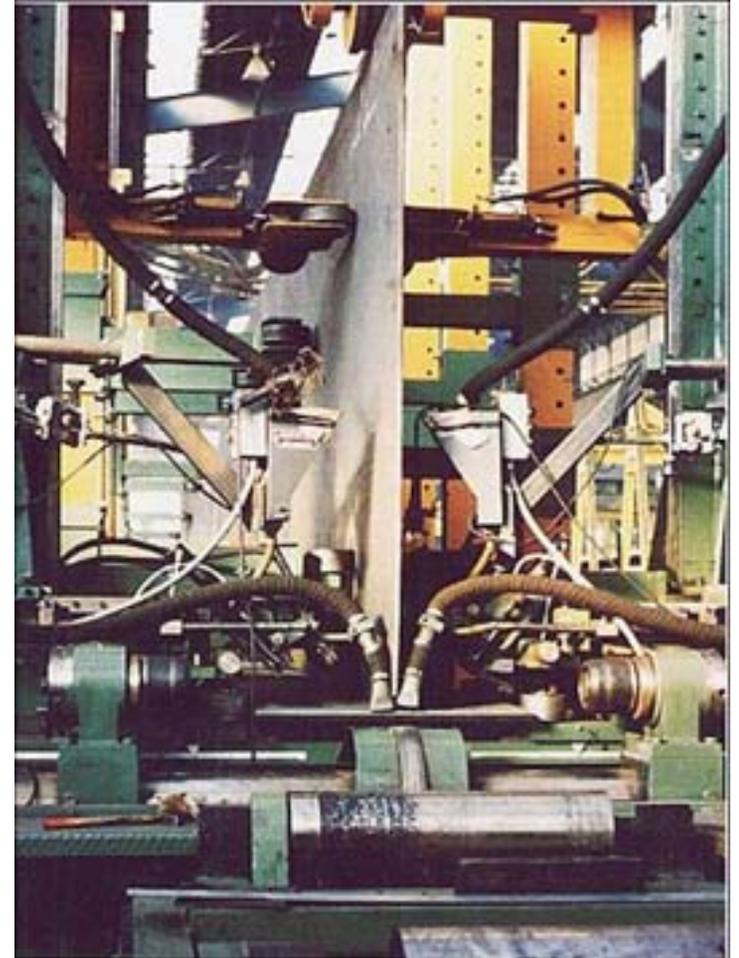
Avantages

Inconvénients

- ✓ Usage limité à la préfabrication en atelier.
- ✓ Limité aux joints à plat (angle et bout à bout).



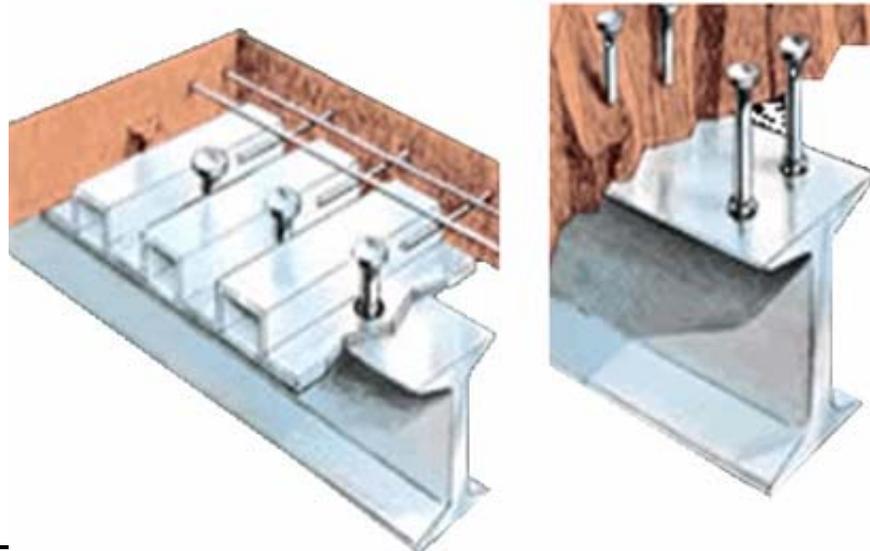
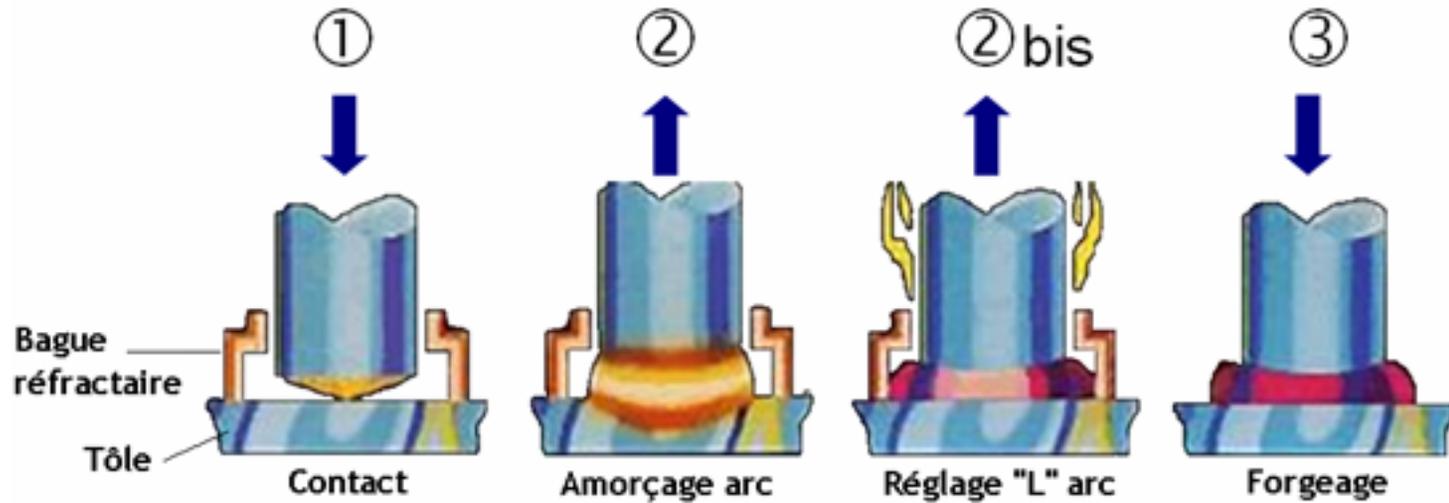
SAW bout à bout



Banc SAW PRS Baudin Châteauneuf



Le soudage à l'arc des goujons (stud welding)





Le soudage à l'arc des goujons (stud welding)

- ✓ L'automate commande les 3 phases de la séquence de soudage.
- ✓ Bague réfractaire confine le métal fondu et limite l'oxydation.
- ✓ Diamètres goujons 6 à 22 mm (en général 16 à 22 mm pour la liaison acier / béton).
- ✓ Productivité remarquable.
- ✓ Mais une grande précision des paramètres mécaniques est nécessaire pour assurer une bonne qualité de la soudure (réglages délicats).



1. Les procédés
2. Base de choix des procédés
3. Les produits d'apports
4. Défectologie
5. Fissuration à froid
6. Réglementation
7. Les contrôles
 - Tôles et profilés
 - Qualification des modes opératoires de soudage
 - Qualification des soudeurs
 - Contrôles non destructifs



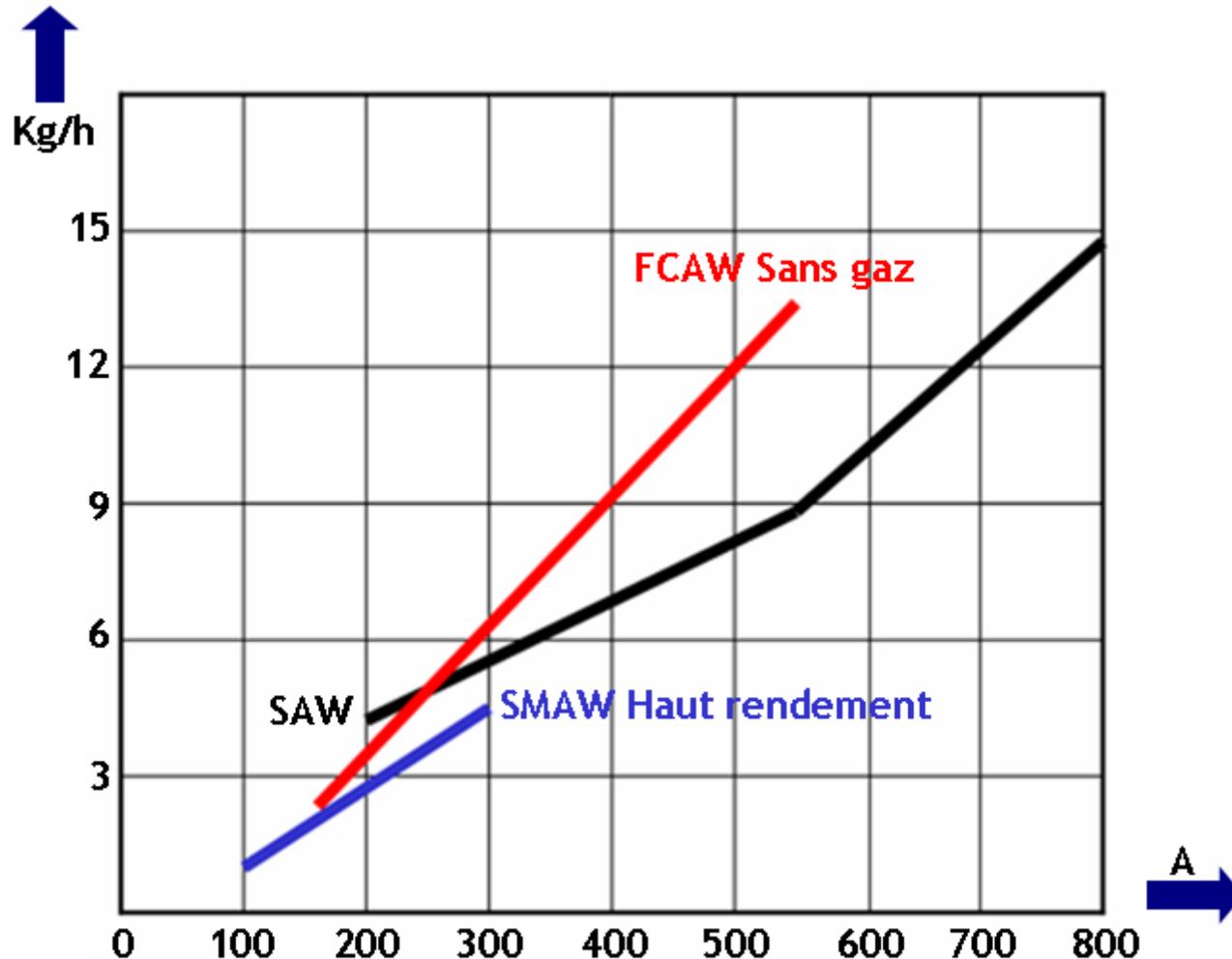
2 - Base de choix des procédés

Les questions à se poser...

- ✓ Epaisseur.
- ✓ Type de joint
 - Bout à bout } pleine pénétration
 - } pénétration partielle
 - Té angle
- ✓ Niveau de qualité requis (résilience, dureté, compacité..) ⇒ SMAW enrobage basique, SAW...
- ✓ Risque arrachement lamellaire ⇒ tôles Z mode opératoire adapté.
- ✓ En atelier ou en extérieur ⇒ ± gaz
- ✓ Accessibilité
- ✓ Quelles positions
- ✓ Répétitivité ⇒ robots...
- ✓ Longueur importante ⇒ banc SAW... (PRS, augets, caisson...)
- ✓ Productivité ⇒ SAW, fil fourré



Comparaison des taux de dépôt théorique





1. Les procédés
2. Base de choix des procédés
3. Les produits d'apports
4. Défectologie
5. Fissuration à froid
6. Réglementation
7. Les contrôles
 - Tôles et profilés
 - Qualification des modes opératoires de soudage
 - Qualification des soudeurs
 - Contrôles non destructifs



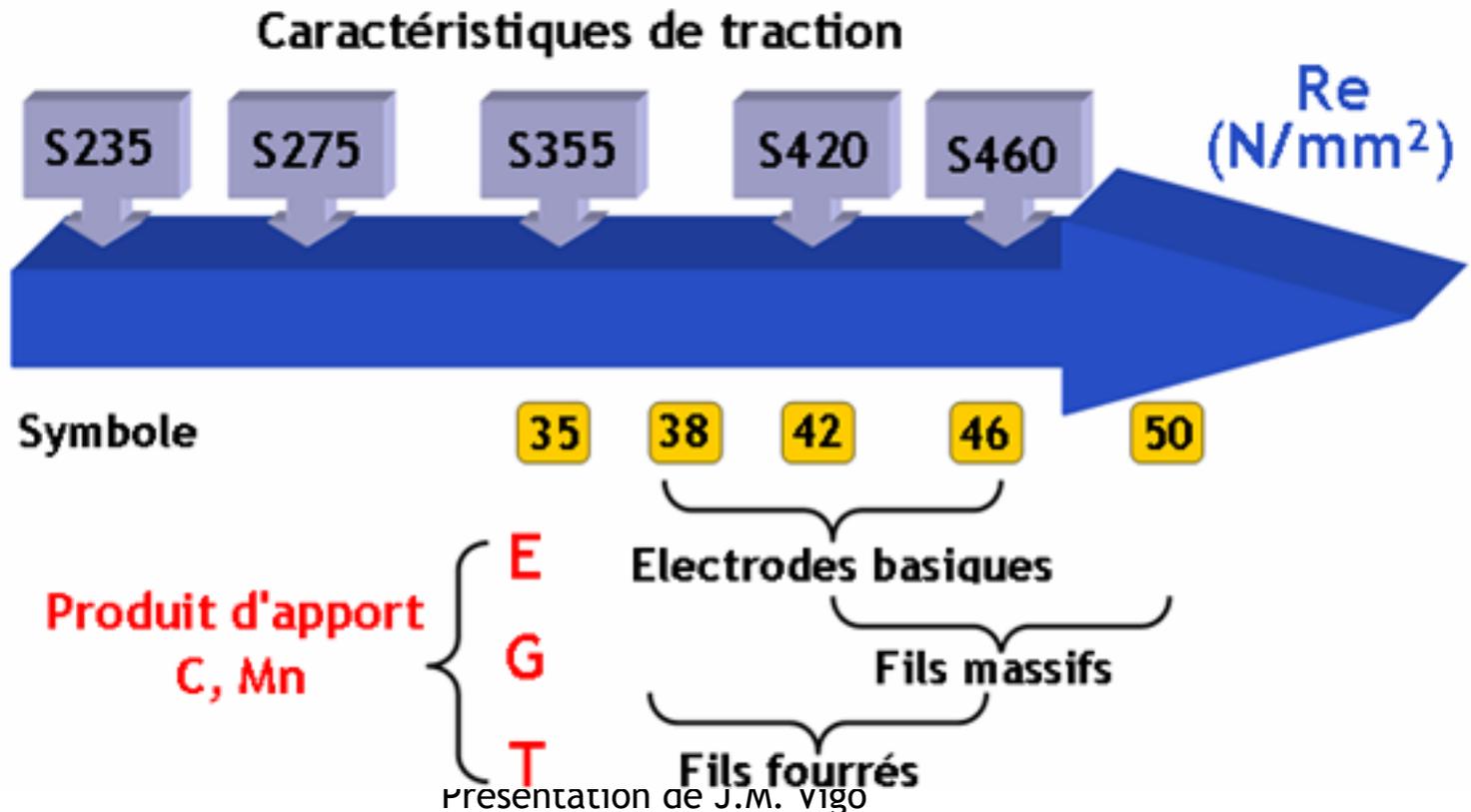
3. Les produits d'apports (1/2)

Règles :

Propriétés de traction & résilience \geq aux mini Métal de Base (MB).

MB: 5 nuances (R_e) de 235 N/mm² à 460 N/mm² (NF EN 10025 partie 1 à 6 - Mars 2005 -).

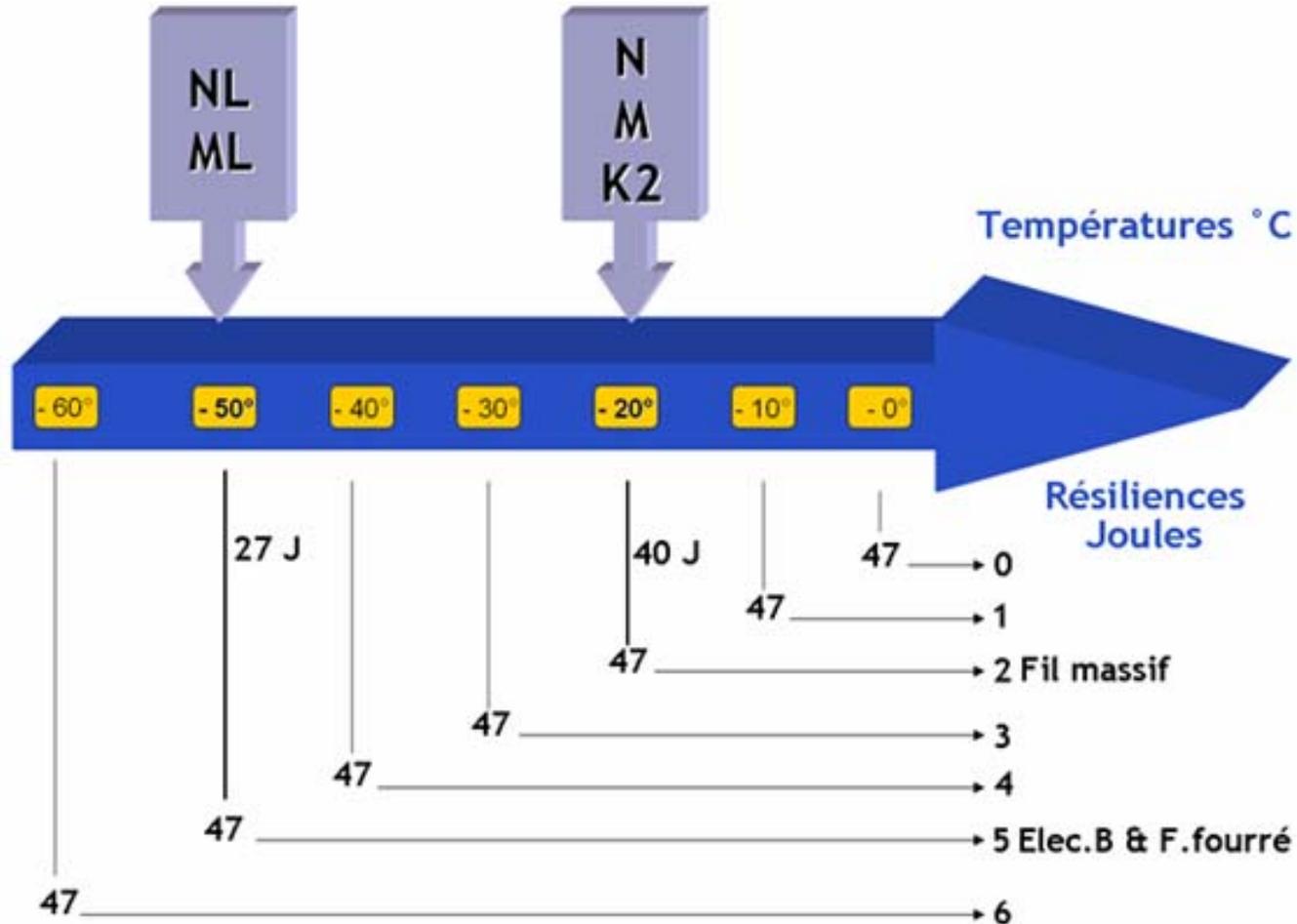
Produits d'apport: 5 nuances (R_e) et 7 qualités (KV) (EN-499, 440, 758)





3. Les produits d'apports (2/2)

Résilience ou caractéristiques de résistance à la flexion par choc





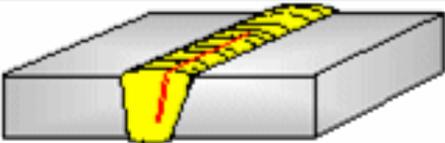
1. Les procédés
2. Base de choix des procédés
3. Les produits d'apports
4. **Défectologie**
5. Fissuration à froid
6. Réglementation
7. Les contrôles
 - Tôles et profilés
 - Qualification des modes opératoires de soudage
 - Qualification des soudeurs
 - Contrôles non destructifs



4. Défectologie

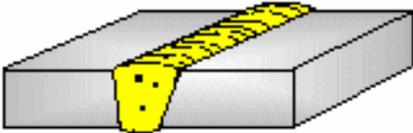
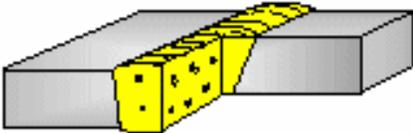
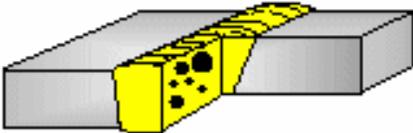
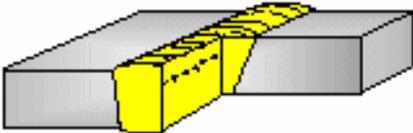
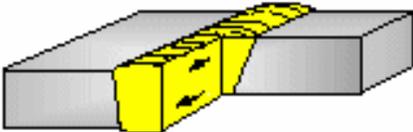
5 groupes de défauts selon NF-EN 26250

GROUPE 1 - FISSURES

Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
101	FISSURE LONGITUDINALE		LONGITUDINAL CRACK
102	FISSURE TRANSVERSALE		TRANSVERSE CRACK
103	FISSURES RAYONNANTES		RADIATING CRACK
104	FISSURES DE CRATERE		CRATER CRACK

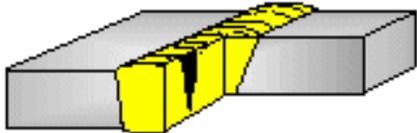
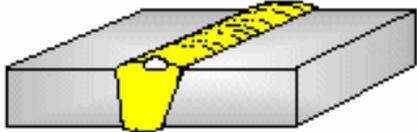
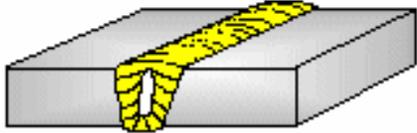
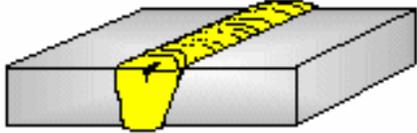


GRUPE N° 2 - CAVITÉS (1/2)

Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
2011	SOUFFLURE SPHEROIDALE		GAS PORE
2012	SOUFFLURES UNIFORMEMENT REPARTIES		UNIFORMLY POROSITY
2013	NID DE SOUFFLURES		CLUSTERED POROSITY
2014	SOUFFLURES ALIGNEES		LINEAR POROSITY
2015	SOUFFLURES ALLONGEES		ELONGATED POROSITY

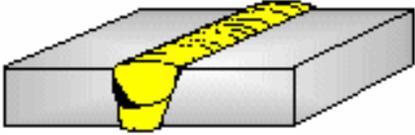
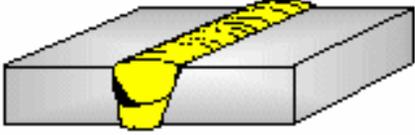
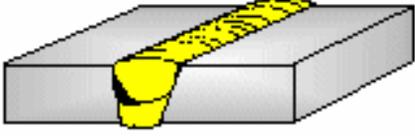
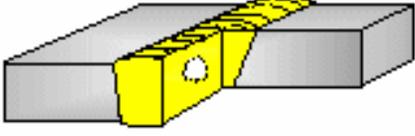


GROUPE N° 2 - CAVITÉS (2/2)

Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
2016	SOUFFLURE VERMICULAIRE		WORM HOLE
2017	PIQURE		SURFACE PORE
2021	REASSURE INTERDENTRITIQUE		INTERDENDRITIC SHRINKAGE
2024	REASSURE DE CRATERE		CRATERE PIPE

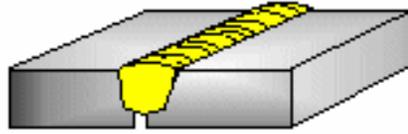
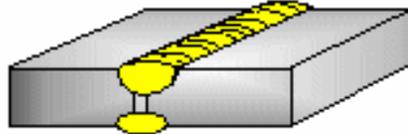


GROUPE N° 3 - INCLUSIONS SOLIDES

Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
301	INCLUSION DE LAITIER		SLAG INCLUSION
302	INCLUSION DE FLUX		FLUX INCLUSION
303	INCLUSION D'OXYDE		OXIDES INCLUSION
304	INCLUSION METALLIQUE		METALLIC INCLUSION



GRUPE N° 4 - MANQUE DE PÉNÉTRATION

Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
402	MANQUE DE PENETRATION		LACK OF PENETRATION
402	MANQUE D'INTERPENETRATION		LACK OF PENETRATION

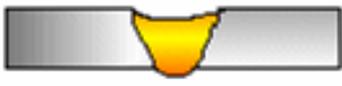


GRUPE N° 5 - DÉFAUTS DE FORME (1/3)

Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
5011	CANIVEAU		UNDERCUT
5012	MORSURE		UNDERCUT
5013	CANIVEAU A LA RACINE		SHRINKAGE GROOVE
502	SUREPAISSEUR EXCESSIVE		EXCES WELD METAL
504	EXCES DE PENETRATION		EXCESSIVE PENETRATION
5041	GOUTTE OU EXCES LOCAL DE PENETRATION		EXCESSIVE PENETRATION

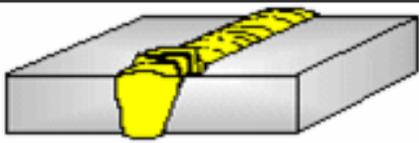


GRUPE N° 5 - DÉFAUTS DE FORME (2/3)

Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
506	DEBORDEMENT		OVERLAP
507	DEFAUT D'ALIGNEMENT		LINEAR MISALIGNMENT
508	DEFORMATION ANGULAIRE		ANGULAR MISALIGNMENT
509	EFFONDREMENT		SAGGING
511	MANQUE D'ÉPAISSEUR		INCOMPLETE FILLED GROOVE
515	RETASSURE A LA RACINE		ROOT CONVEXITY



GRUPE N° 5 - DÉFAUTS DE FORME (3/3)

Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
516	ROCHAGE		POROSITY DUE TO CARBONE MONOXIDE
517	MAUVAISE REPRISE		POOR RESTART



En fait : 3 grandes catégories de défauts

Défauts plans => = **DEFAUTS NOCIFS**

- ✓ fissure à froid (H₂+ martensite+contraintes)
- ✓ fissure à chaud (ségrégation S, P, oxydes...)
- ✓ collage ou manque de fusion(E_j, géométrie, CO₂...)

Rédhibitoires

Défauts de forme=> =**ACCENTUENT L'EFFET D'ENTAILLE**

(amorçage fissure fatigue, rupture brutale)

- ✓ caniveau, trop forte surépaisseur, effondrement, manque de pénétration,...
- ✓ NF P22471 définit 3 classes de critères d'acceptation selon le rôle et le niveau de sollicitation de l'élément dans la structure

Défauts volumiques => = **DEFAUTS PEU NOCIFS**

- soufflure
- inclusion de laitier
- réfractaire(électrode TIG...)

NF P22471 définit des critères d'acceptation US et Radio pour en limiter le nombre



1. Les procédés
2. Base de choix des procédés
3. Les produits d'apports
4. Défectologie
5. **Fissuration à froid**
6. Réglementation
7. Les contrôles
 - Tôles et profilés
 - Qualification des modes opératoires de soudage
 - Qualification des soudeurs
 - Contrôles non destructifs



5 - ZOOM sur la fissuration à froid (1/2)

Processus de fissuration dans la zone **trempeée** par le cycle de soudage, sous l'action conjuguée des **contraintes** propres et de l'**hydrogène** en provenance de la zone fondue par diffusion. Sa progression peut durer 24 heures jusqu'à ce que la concentration d'hydrogène qui évolue constamment ait suffisamment régressé.

La réduction du risque de fissuration à froid passe donc par :

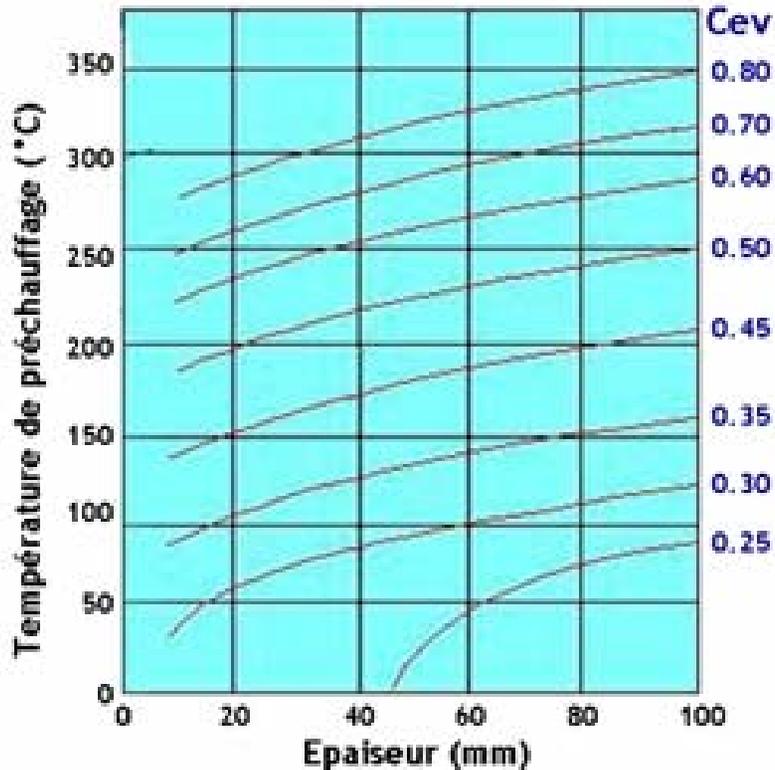
- ✓ **Réduction H₂**: Choix d'électrodes à bas hydrogène
- ✓ **Réduction des contraintes**: Séquence de soudage adaptée de façon à contourner les effets de bridage, jouer sur énergie de soudage, R_e métal d'apport à minimiser, jouer sur la conception des assemblages..
- ✓ **Réduction des risques de trempe locale**: Choix métal (privilégier un CEV bas), adapter l'énergie de soudage, pré-chauffer voire post-chauffer le joint si nécessaire



5 - ZOOM sur la fissuration à froid (2/2)

IIS doc.IX 646-69

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$



Valeurs indicatives et robustes (acier C-Mn) à moduler en fonction :

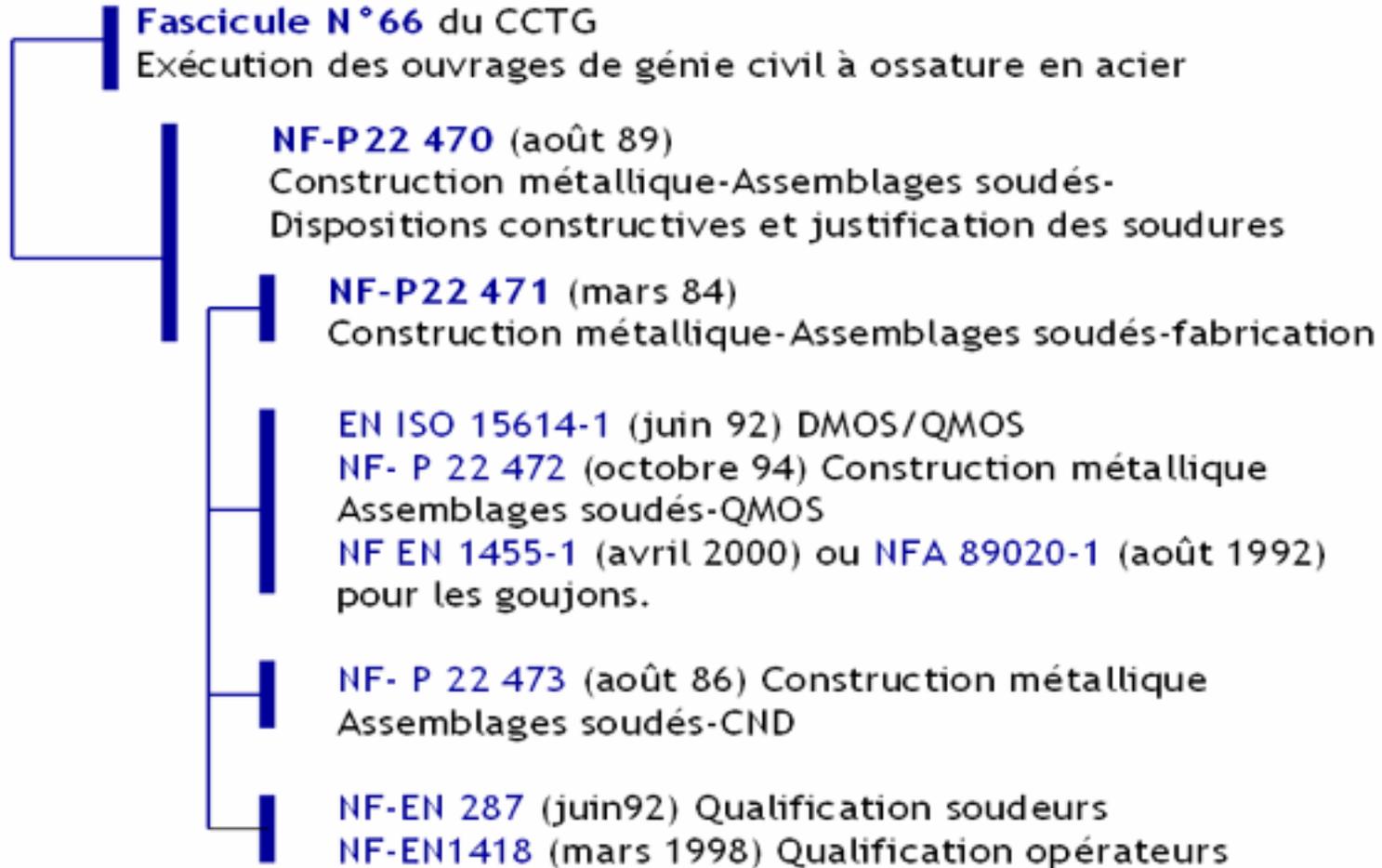
- ✓ énergie de soudage,
- ✓ niveau de contraintes,
- ✓ teneur en H₂ électrodes



1. Les procédés
2. Base de choix des procédés
3. Les produits d'apports
4. Défectologie
5. Fissuration à froid
- 6. Réglementation**
7. Les contrôles
 - Tôles et profilés
 - Qualification des modes opératoires de soudage
 - Qualification des soudeurs
 - Contrôles non destructifs



6 - Réglementation





1. Les procédés
2. Base de choix des procédés
3. Les produits d'apports
4. Défectologie
5. Fissuration à froid
6. Réglementation
7. **Les contrôles**
 - Tôles et profilés
 - Qualification des modes opératoires de soudage
 - Qualification des soudeurs
 - Contrôles non destructifs



7- Les contrôles ou opérations de surveillance

Les opérations de surveillance de la construction font l'objet d'un plan décrivant de manière chronologique, **l'objet** (exemple: note de calcul, plans de fabrication, réception des tôles, des produits d'apport, qualification des modes opératoires de soudage, qualifications des soudeurs, procédures de contrôle non destructifs, participation aux contrôles)

Ce plan **détaille les opérations de surveillance** à accomplir ainsi que les **Points d'Arrêt** (PA=avis obligatoire de l'inspecteur avant de passer à l'étape suivante) et les documents de références.

Surveillance assurée soit par un organisme d'inspection désigné par le maître d'œuvre, soit par le constructeur (nécessité d'un MAQ & guide d'audit accepté par le maître d'œuvre)

Mots clefs = AQ, MAQ, PAQ, PA, Non Conformité, traitement NC, traçabilité



7- Les contrôles ou opérations de surveillance

Tôles et profilés

Conformité au fascicule 66 et nouveau fascicule 4 titre 3 (décret N°2000-524.juin2000) et/ou avec la marque équivalente « NF-Acier » référentiel « 2B » (ouvrages d'art et bâtiments non courants) en termes d'agrément des fournisseurs.

Vérification des certificats matières (EN 10025 partie 1 à 6) et traçabilité physique.

S'assurer que qualités et nuances / épaisseurs sont homogènes avec la réglementation actuelle et le futur Eurocode 3...

Objectif : Se prémunir des risques de rupture fragile.

S355K2 épais. $\leq 30\text{mm}$

S355N $30 < \text{épais.} \leq 80\text{mm}$

S355NL épais $> 80\text{mm}$

S420/460 N épais. $\leq 50\text{mm}$

S420/460 NL épais. $> 50\text{mm}$

S420/460 M épais. $\leq 50\text{mm}$

S420/460 ML épais. $> 50\text{mm}$



7- Les contrôles ou opérations de surveillance

Qualification des Modes Opératoires de Soudage (QMOS)

Préalable : définir les classes de qualités requises Fasc 66 et NF-P22471

- ✓ Niveau 1: joints transversaux tendus (poutres principales et membrures)
- ✓ Niveau 2: autres joints
- ✓ Niveau 3: accessoires

QMOS apportent des garanties sur les plans métallurgiques et propriétés mécaniques, sont obligatoires pour les niveaux de qualité 1 & 2

Les modalités d'exécution des QMOS sont définies par EN ISO 15614-1 pour les généralités et NF-P 22472 pour les dispositions particulières

Les QMOS font en fin d'essai l'objet d'un procès verbal PV de réception



7- Les contrôles ou opérations de surveillance

Qualification des soudeurs & opérateurs

Les défauts de forme et certains défauts de compacité dépendent de l'habileté du soudeur ou réglages choisis par l'opérateur. Leur capacité doit être reconnue.

Le soudeur ou opérateur effectue donc un assemblage donné dans des conditions définies par l'EN 287-1 ou NF EN 1418.

En fin d'essai un certificat de qualification est émis.



7- Les contrôles ou opérations de surveillance

Contrôles non destructifs (CND)

NF-P 22471:

Précise l'organisation des CND et critères d'acceptation.

NF-P 22473:

Précise l'étendue des CND en fonction des types de soudures, types de sollicitations et lieux d'exécution (atelier ou chantier)

Ex: 100% US pour nœuds bout à bout à 10%ressuage ou magnéto pour des soudures d'angle non interpénétrées.

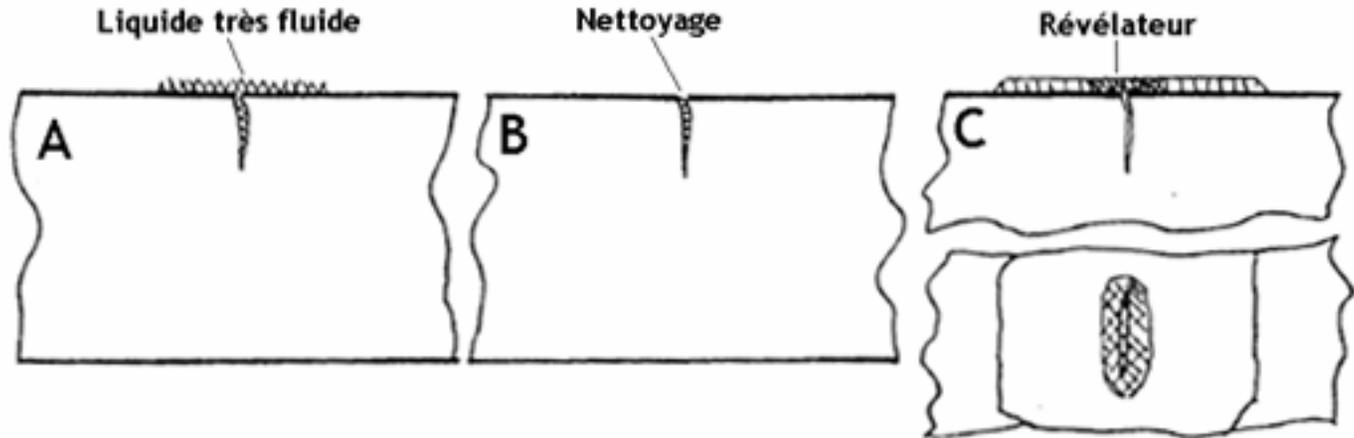
Peuvent être mis en œuvre les CND suivants :

- ✓ Visuel
- ✓ Ressuage
- ✓ Magnétoscopie
- ✓ Radiographie
- ✓ Ultrasons

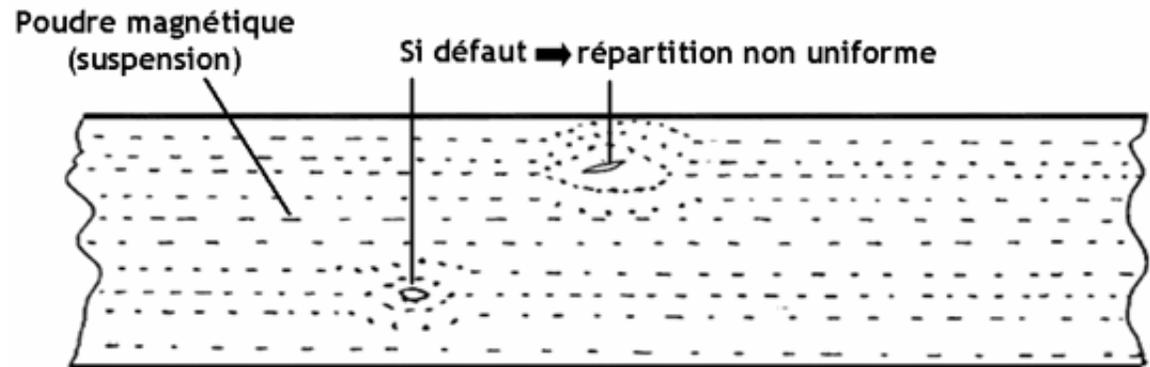


7- Les contrôles ou opérations de surveillance

Ressuage



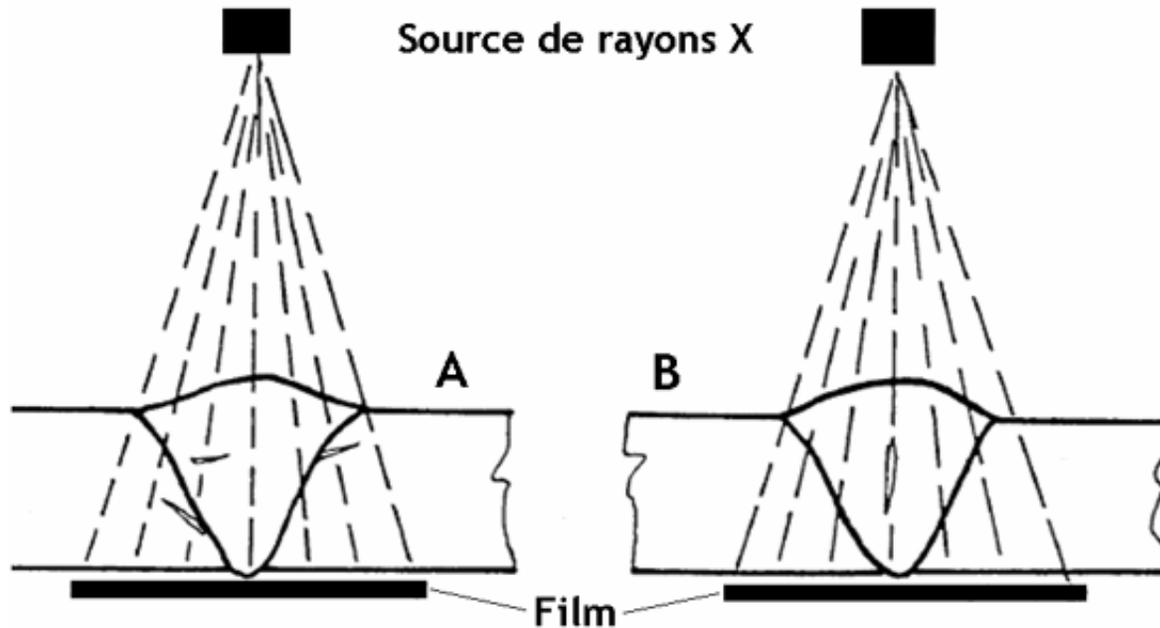
Magnétoscopie





7- Les contrôles ou opérations de surveillance

Radiographie



Contrôle radiographique aux rayons X

(A) : fissures difficilement décelables (B) : fissures décelables

Différence de pouvoir absorbant rayon X ou gamma métal/défaut =>
 Densité > => blanc sur noir, densité < => noir sur blanc



7- Les contrôles ou opérations de surveillance

Radiographie



Appareil de radiologie gamma

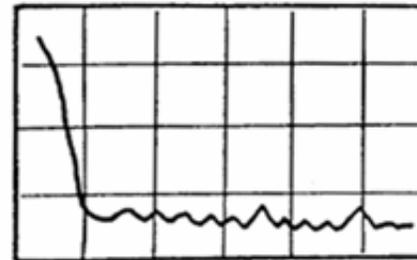
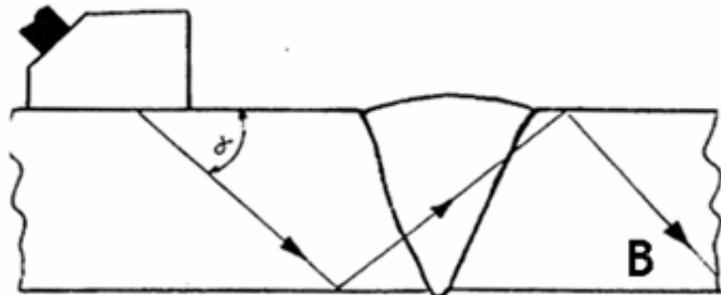
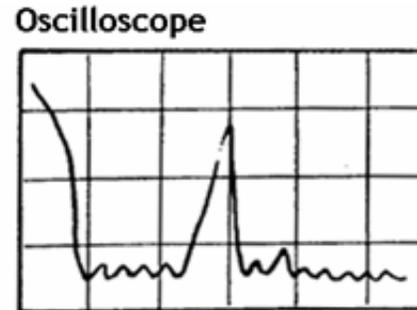
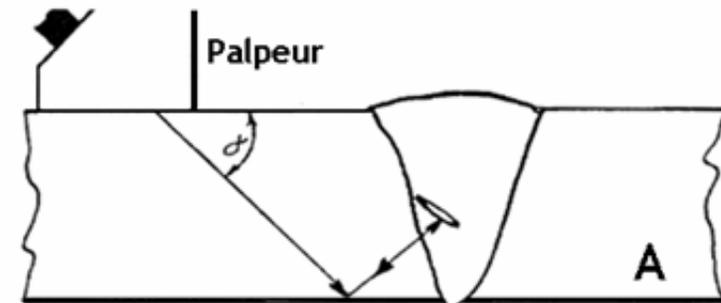


Radio X soudure virole



7- Les contrôles ou opérations de surveillance

Ultrasons



(A) : pièce avec défaut;

Contrôle par ultrasons

(B) : pièce sans défaut, pas de réflexion à l'oscillogramme.



Contrôle US soudure circulaire



Conclusion

Les évolutions des procédés de soudage, des aciers de construction, et des produits d'apport ont facilité la mise en œuvre du soudage dans la construction métallique, notamment pour les aciers à haute limite élastique.

Les « contraintes » des normes tant européennes que particulières d'application nationales et la réglementation française doivent être perçues comme une aide pour atteindre la qualité nécessaire à la pérennité des ouvrages .Celles-ci ont évoluées ces dernières années de façon à simplifier la vie de l'ensemble des acteurs.