A photograph of a large industrial workshop where bridge components are being fabricated. The scene is filled with heavy machinery, including large overhead cranes and complex welding rigs. Several workers are visible, some standing and others working on large metal beams. The environment is brightly lit, and the overall atmosphere is one of active industrial production.

LE SOUDAGE APPLIQUE A LA CONSTRUCTION DES PONTS METALLIQUES

Présenté par Jean-Michel VIGO

OTUA

30/01/03

Préfabrication viaduc de Millau-Atelier EIFFEL Lauterbourg



Menu

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**

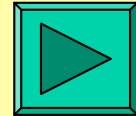
- Qualification des modes opératoires de soudage**

- Qualification des soudeurs**

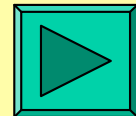
- Contrôles non destructifs**

1 Les procédés

-Le soudage manuel à l'électrode enrobée (SMAW)

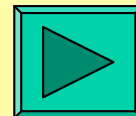


-Le soudage MAG avec fil massif (GMAW)

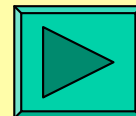


-Le soudage MAG avec fil fourré (FCAW)

-Le soudage sous flux en poudre (SAW)

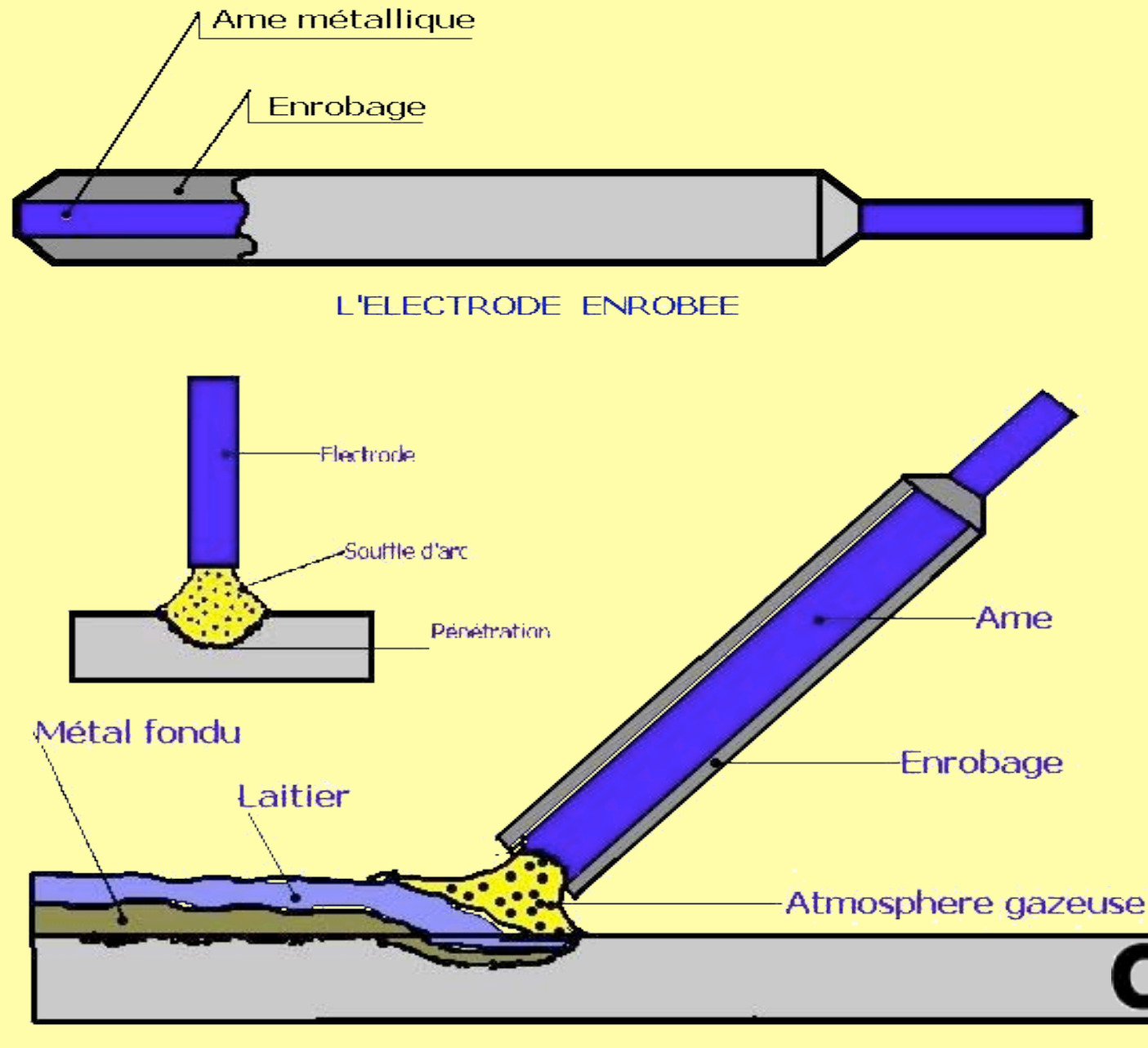


-Le soudage à l'arc des goujons (stud welding)





Le soudage manuel à l'électrode enrobée (SMAW)



Le soudage manuel à l'électrode enrobée (SMAW)

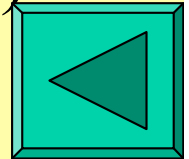
Electrode de type basique => meilleures propriétés mécaniques
Choix d'électrodes aptes à produire un métal fondu de résistance
supérieure à celui du métal de base et des résiliences garanties
à -20°C ou -50°C

Avantage du procédé

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

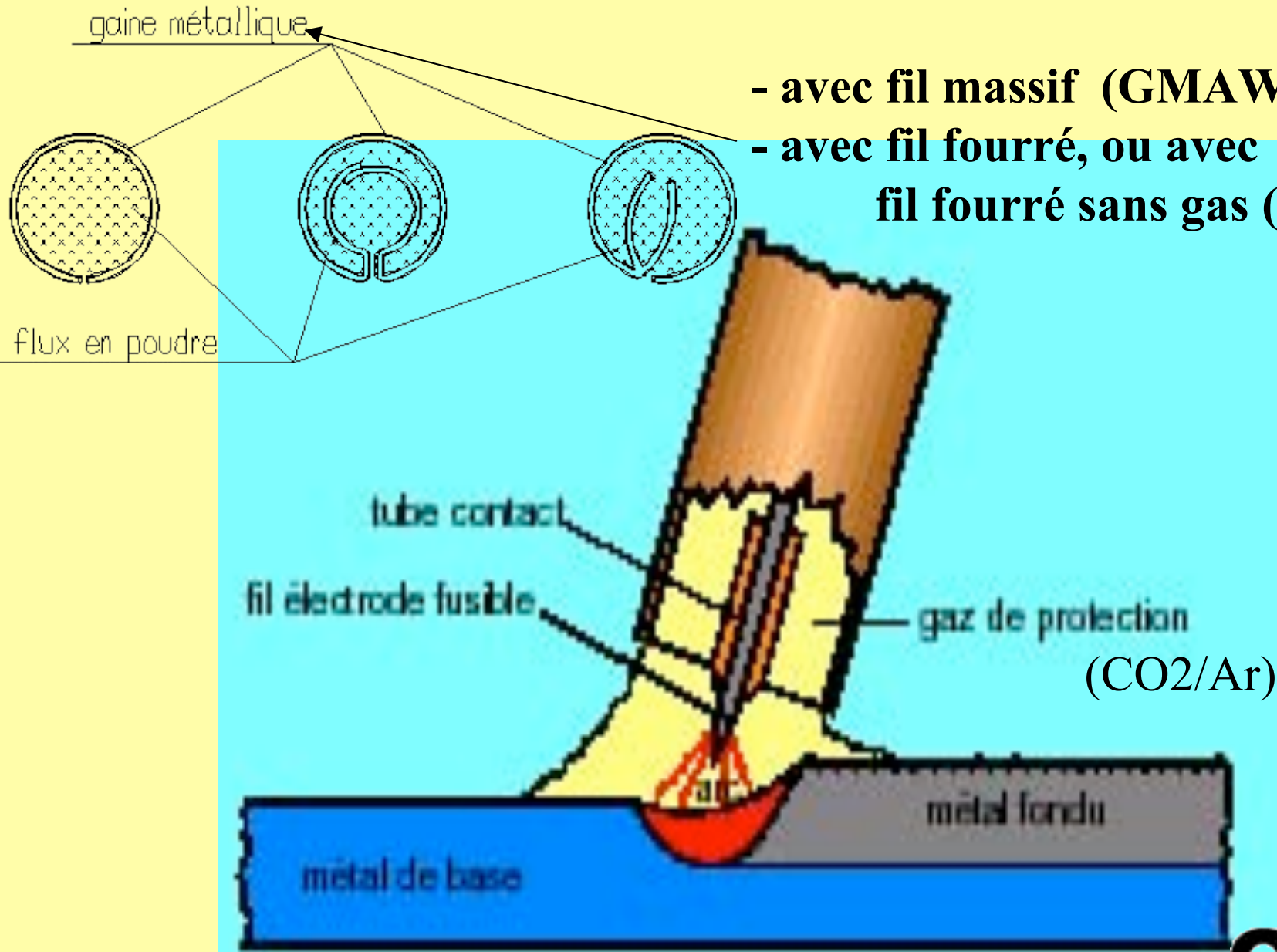
Inconvénient

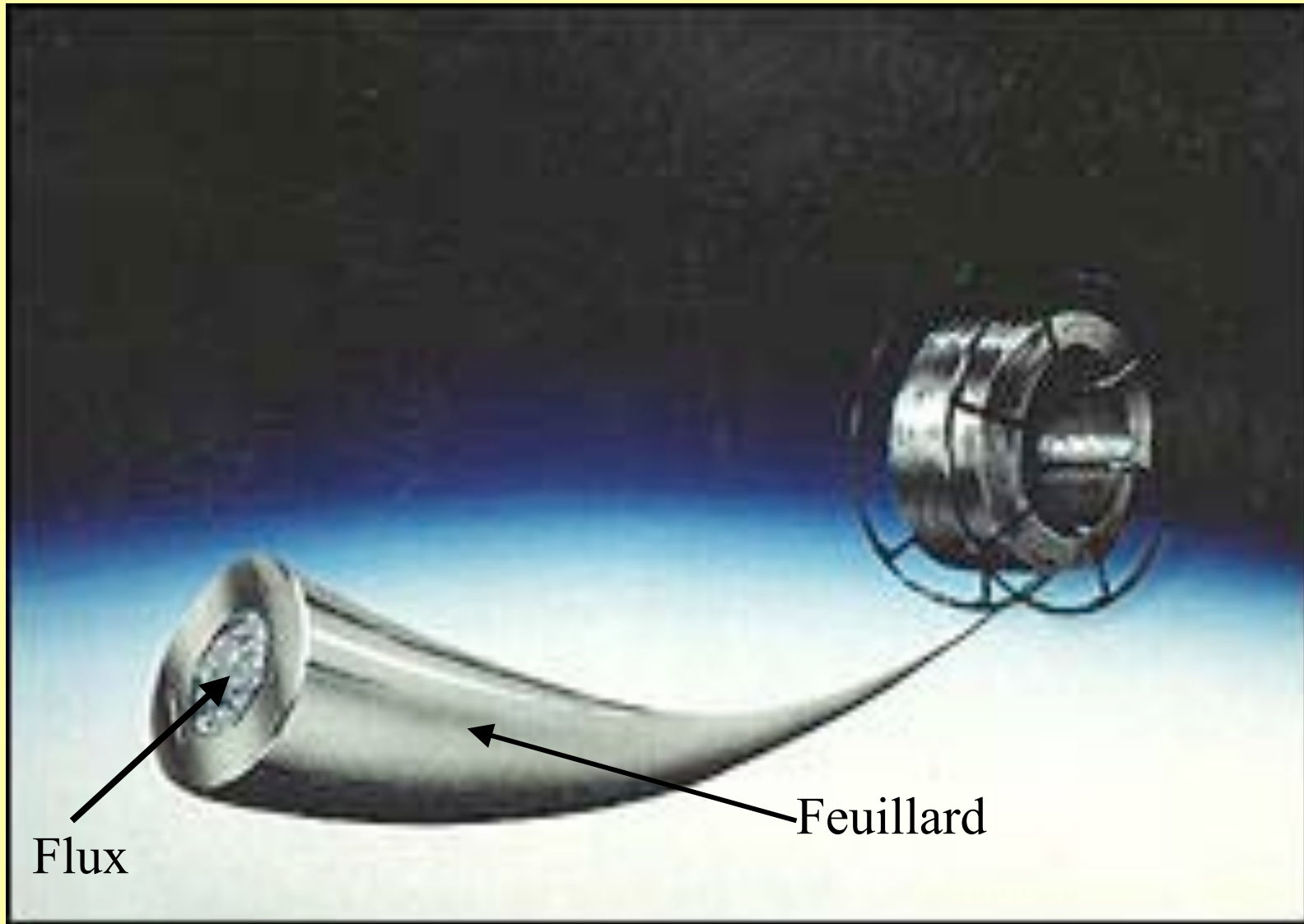
- => faible taux de dépôt (ordre du kg/h)



Le soudage MAG (Metal Active Gas)

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





Flux

Feuillard

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

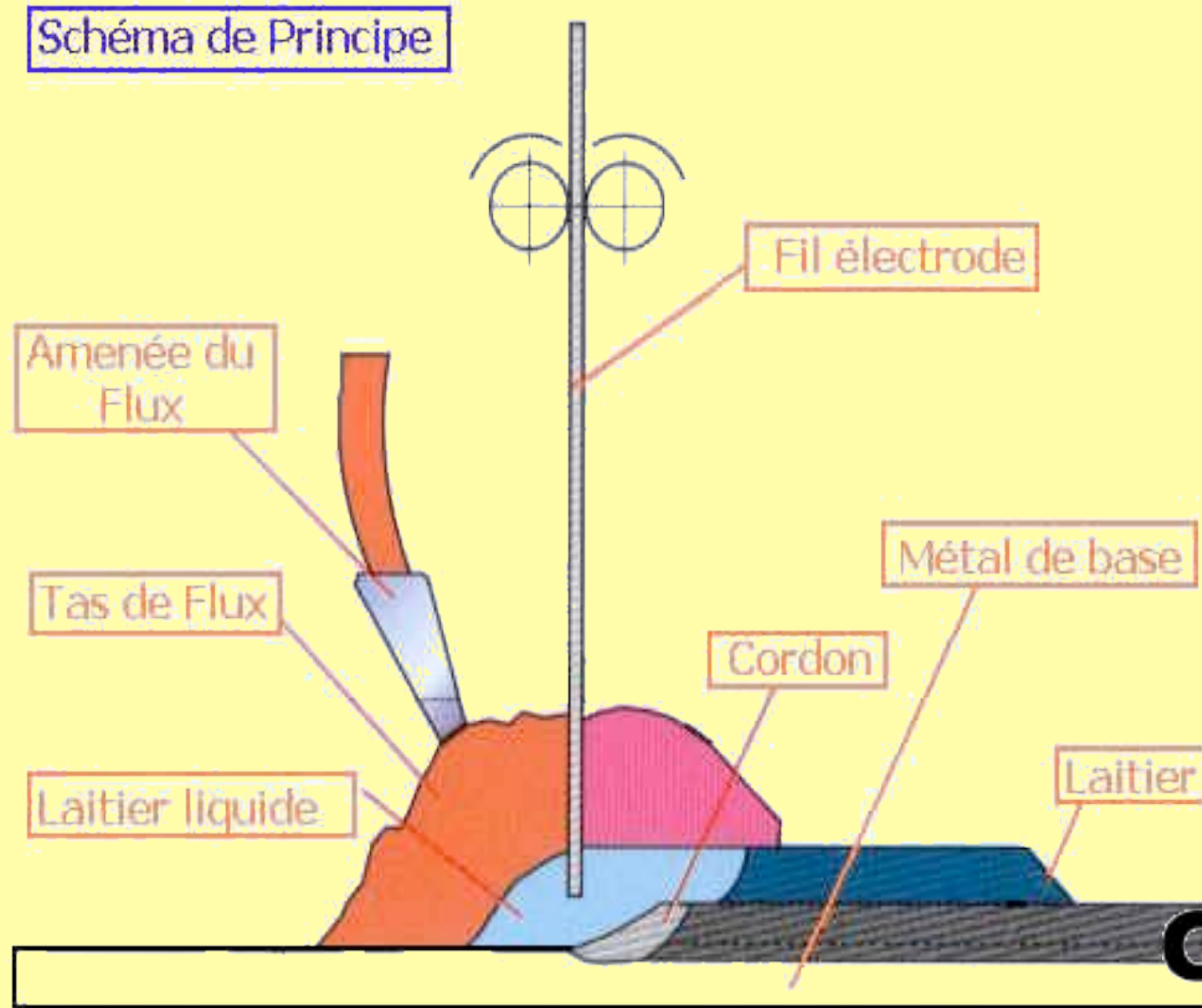
Taux de dépôt supérieur (densité de courant supérieure possible)
et risque de collage inférieur

Meilleures propriétés mécaniques dues à une meilleure maîtrise de la chimie du métal fondu grâce à l'optimisation des éléments ajoutés dans le flux

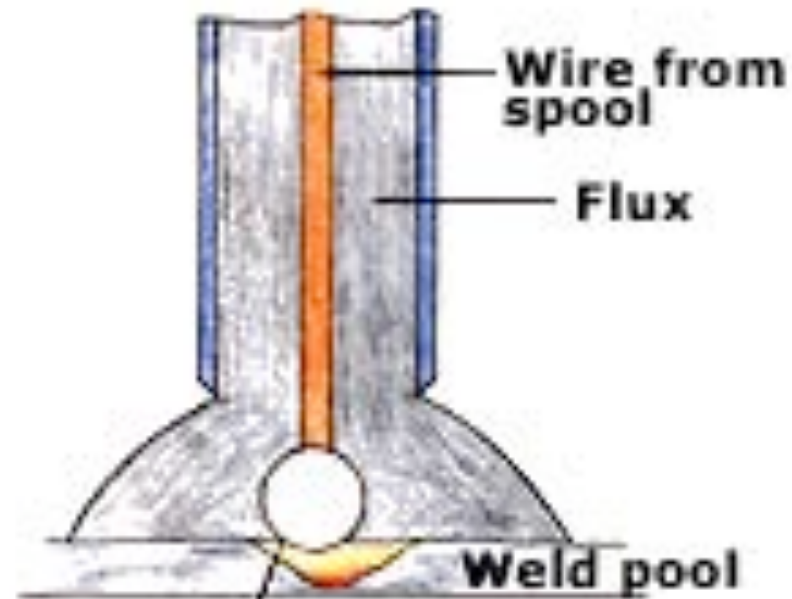
Soudage en extérieur



Le soudage sous flux en poudre(SAW)



SAW transfer mode



Mode: Flux wall guided

Le soudage sous flux en poudre(SAW)

Avantages

Productivité élevée (6 à 12kg/h)

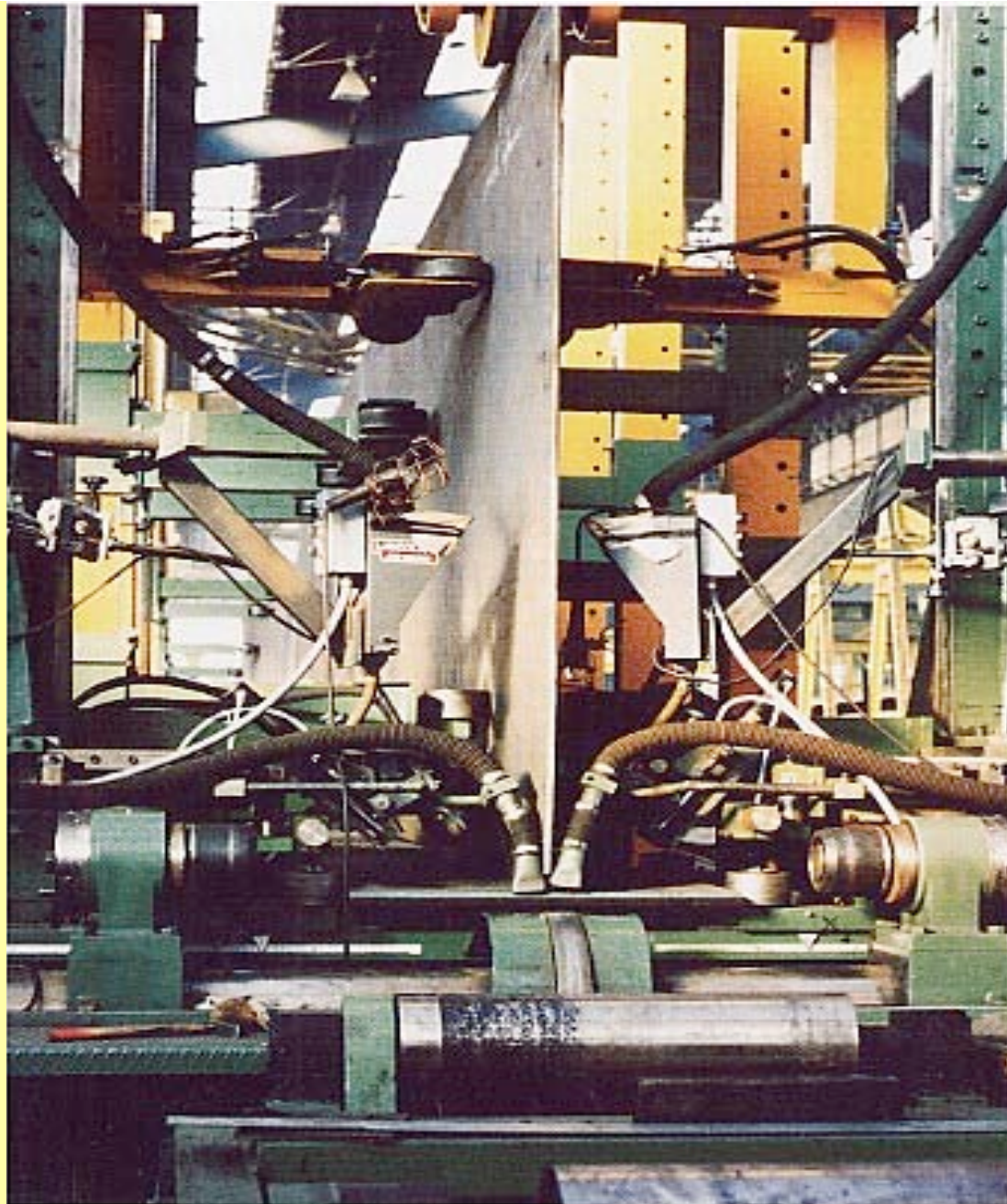
Bancs de soudage mécanisés (PRS, augets)

Excellentes propriétés mécaniques des soudures
(Fil électrode massif (dia 2 à 5 mm)/apport flux))

Inconvénient

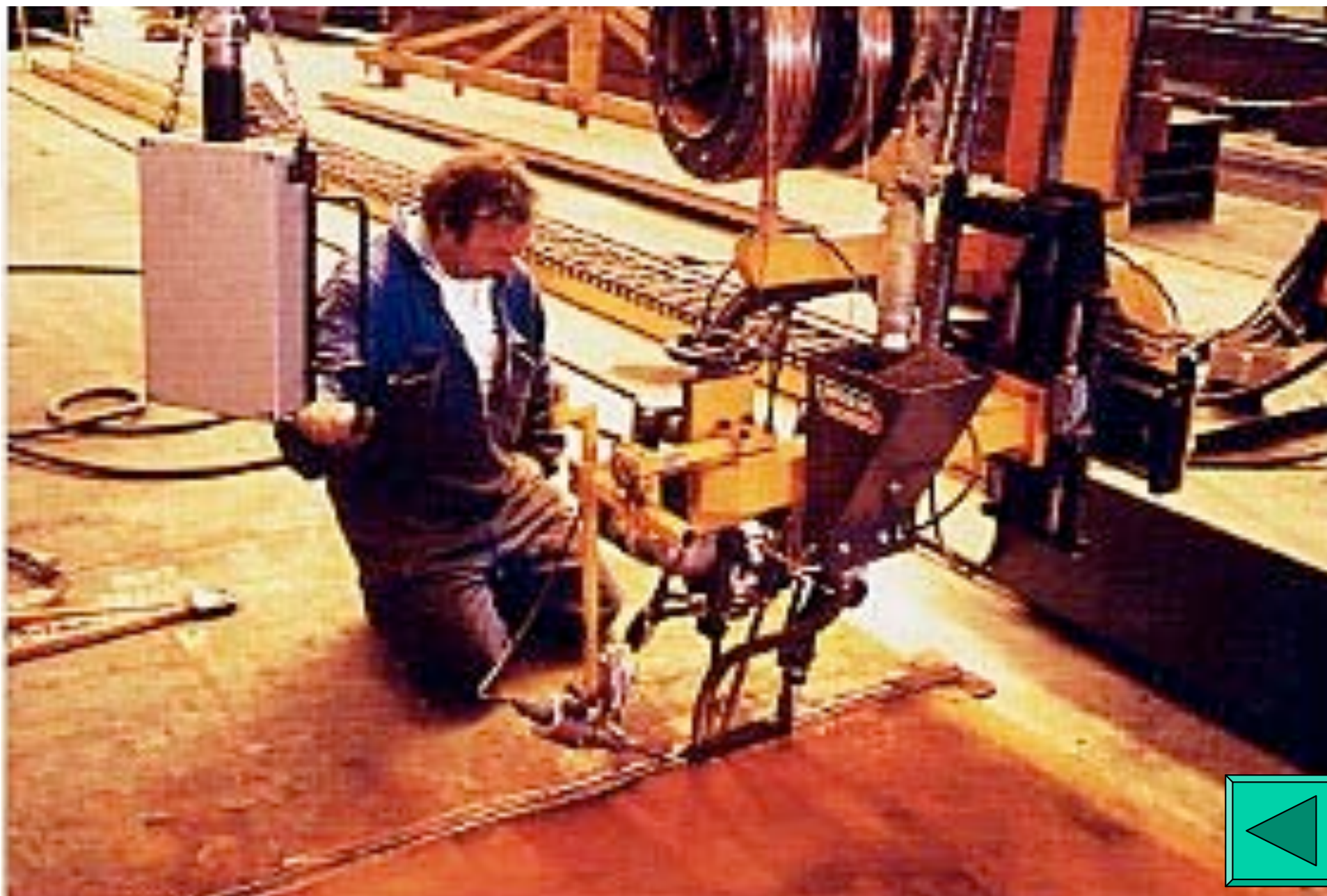
Usage limité à la préfabrication en atelier

Limité aux joints à plat (angle et bout à bout)



Banc SAW PRS Baudin Châteauneuf

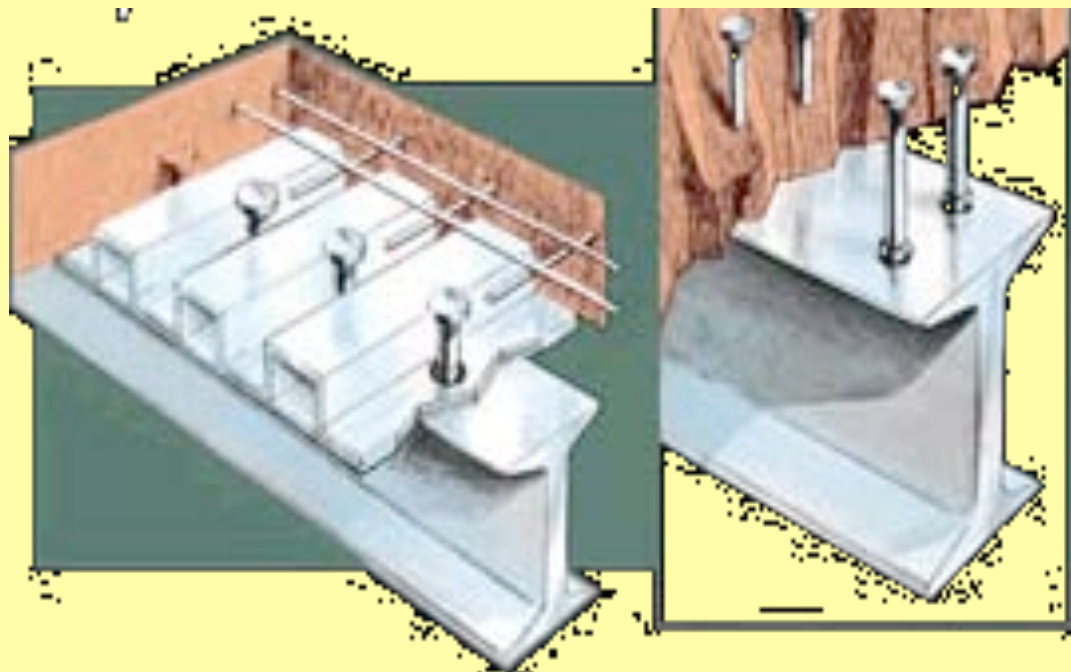
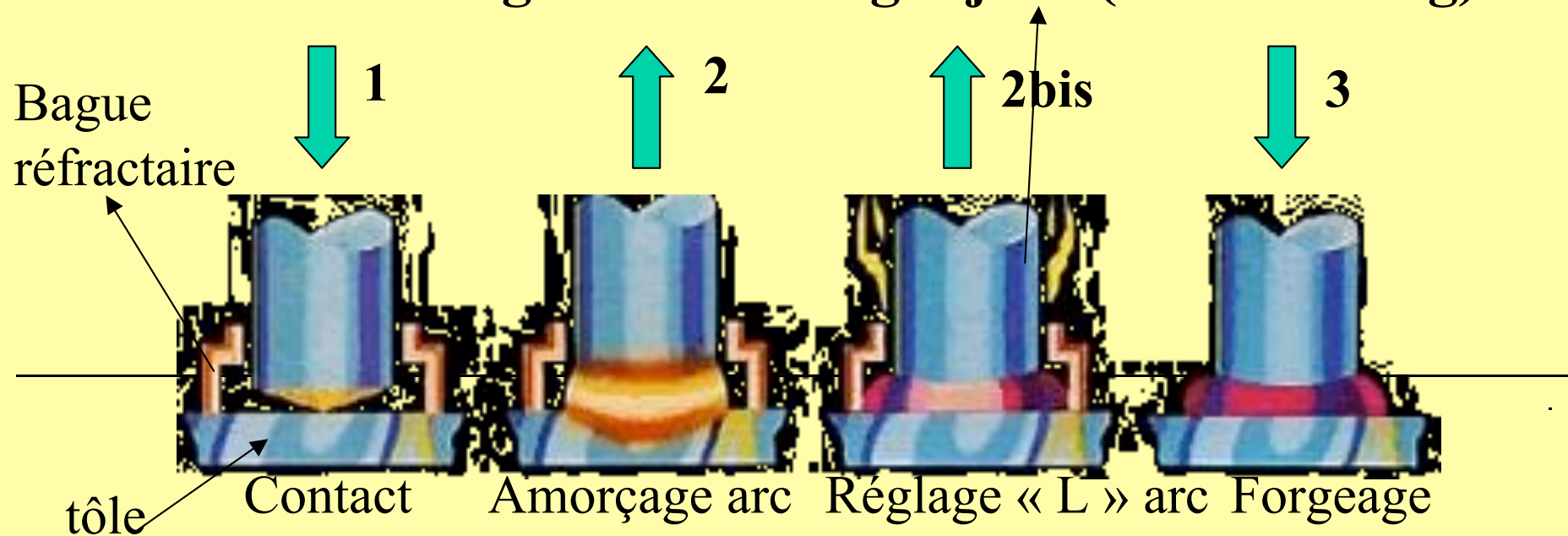




SAW bout à bout

OTUA

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)

Menu

- 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**



Base de choix des procédés

Les questions à se poser...

-Epaisseur

-Types de joints

Bout à bout

Té

} pleine pénétration

pénétration partielle

angle

-Niveau de qualité requis(résilience,dureté, compacité...) =>

SMAW enrobage basique, SAW ...

-Risque arrachement lamellaire

-En atelier ou en extérieur => +- gaz

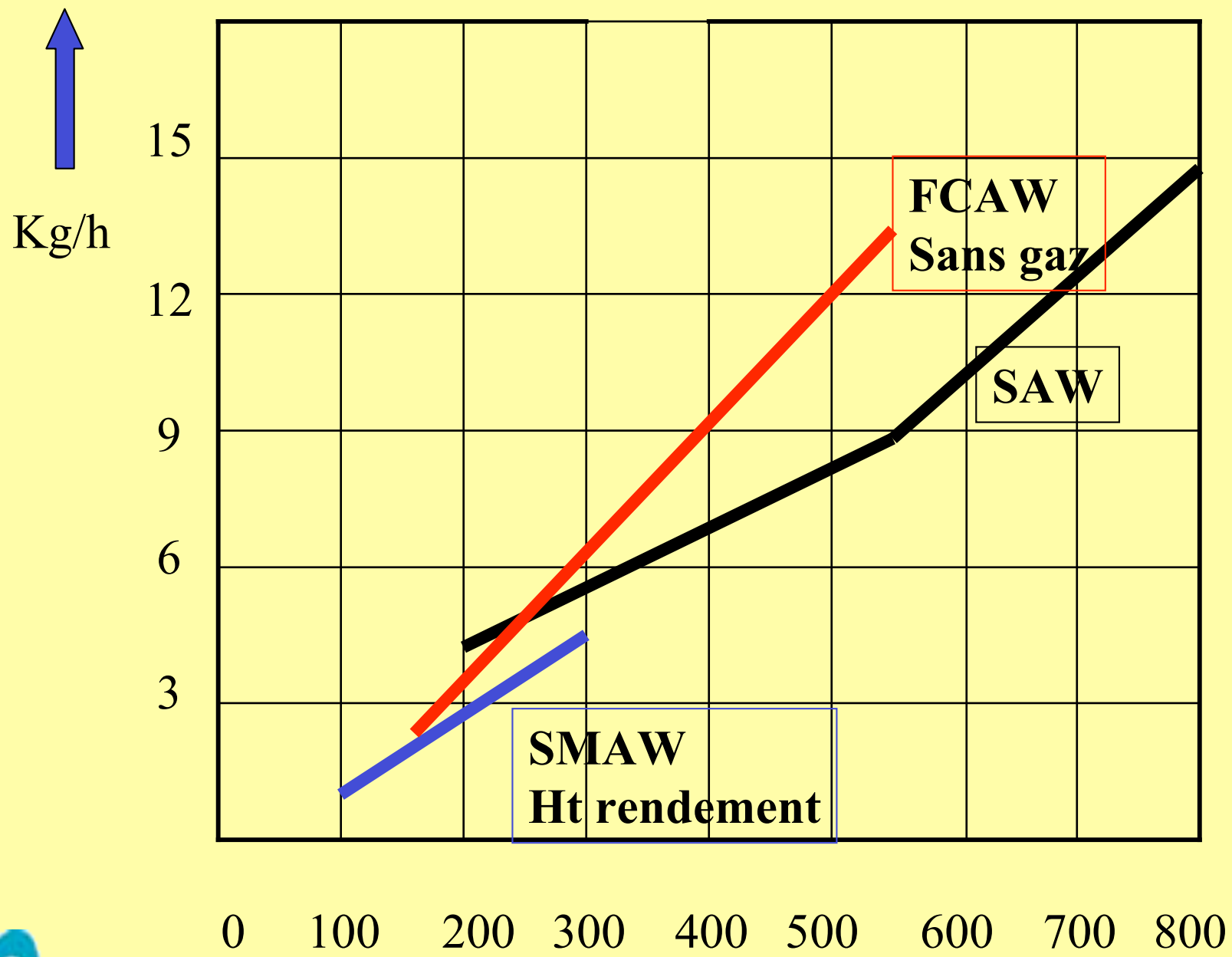
-Accessibilité

-Quelles positions

-Répétitivité => robots ...

-Longueur importante => banc SAW...(PRS, augets, caisson...)

-Productivité =>SAW, fil fourré



Comparaison des taux de dépôt théorique



Menu

- 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**

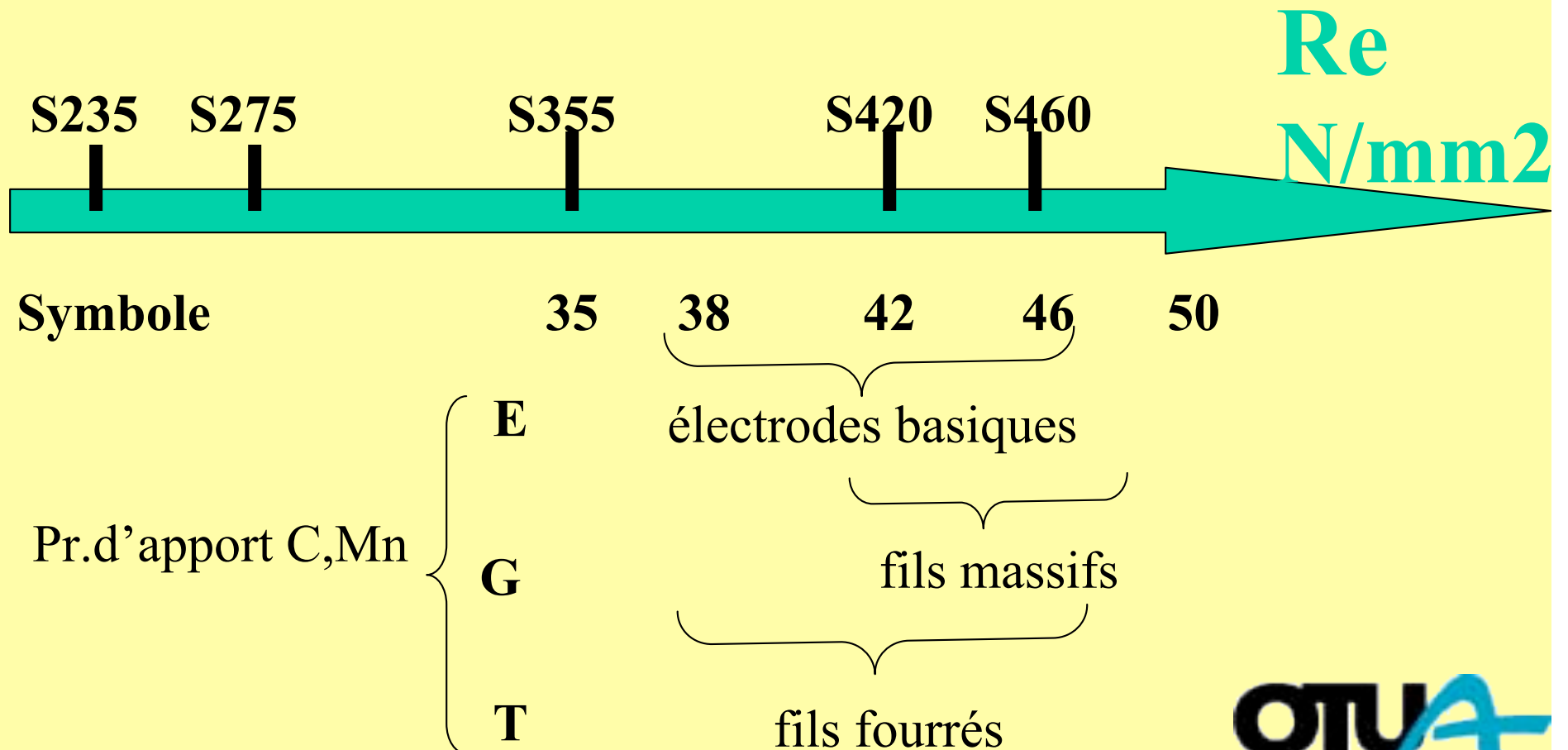
3. Les produits d'apports

Règlement => propriétés de traction & résilience >= aux mini Métal de Base (MB)

MB: 5 nuances(Re) de 235N/mm² à 460 N/mm² (EN10025,10113,10155,10137)

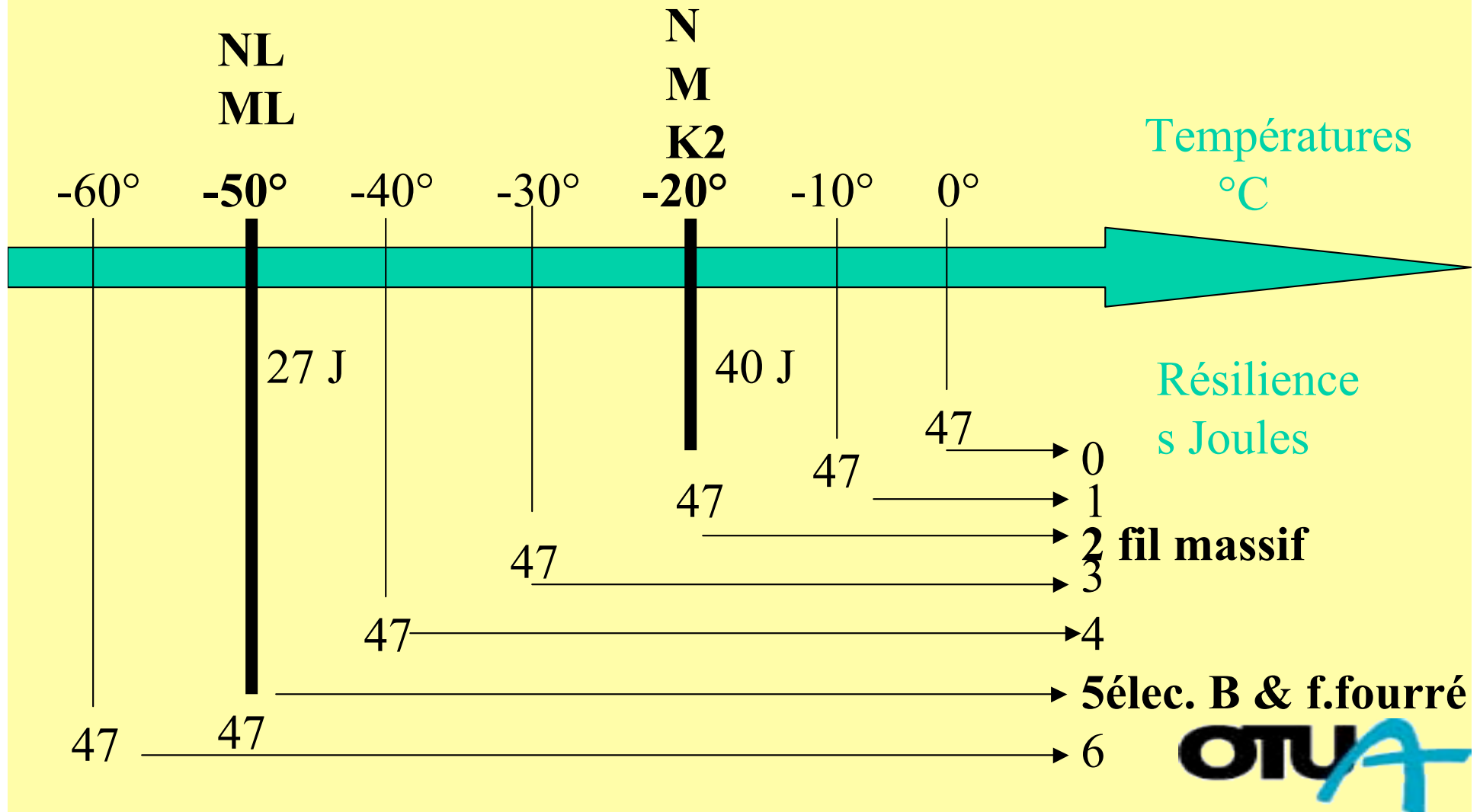
Produits d'apport:5 nuances(Re) et 7 qualités(KV) (EN-499, 440, 758)

Caractéristiques de traction



3. Les produits d'apports ...

Résilience ou caractéristiques de résistance à la flexion par choc



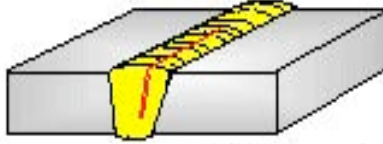


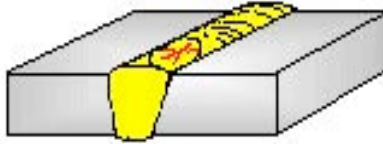
Menu

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

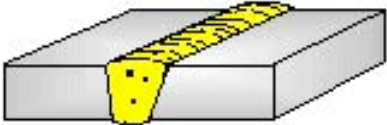
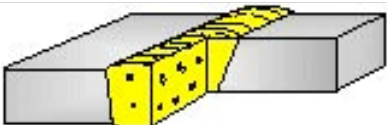
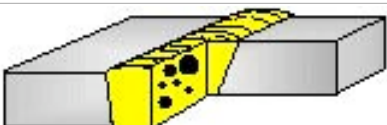
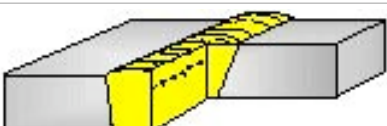
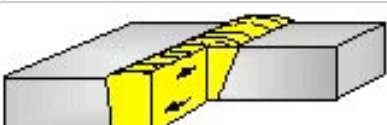
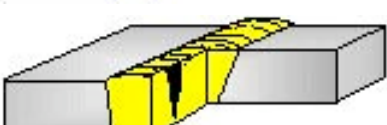
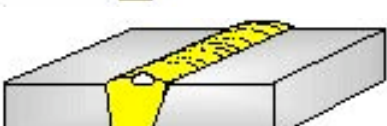
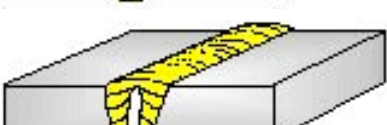




4. Défectologie

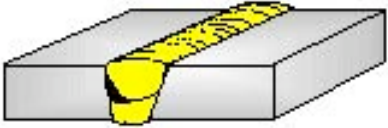
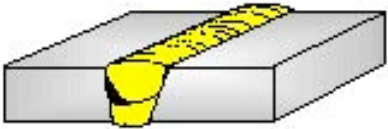
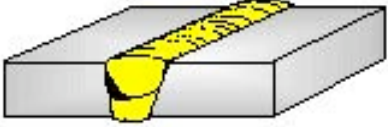
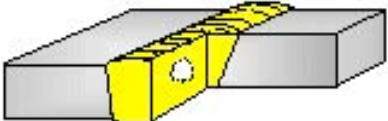
5 groupes de défauts selon NF-EN 26250

Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
GROUPE 1 - FISSURES			
101	FISSURE LONGITUDINALE		LONGITUDINAL CRACK
102	FISSURE TRANSVERSALE		TRANSVERSE CRACK
103	FISSURES RAYONNANTES		RADIATING CRACK
104	FISSURES DE CRATÈRE		CRATER CRACK



GRUPE N° 2 - CAVITÉS

<p>2011</p>	<p>SOUFFLURE SPHÉROÏDALE</p>		<p>GAS PORE</p>
<p>2012</p>	<p>SOUFFLURES UNIFORMÉMENT REPARTIES</p>		<p>UNIFORMLY DISTRIBUTED POROSITY</p>
<p>2013</p>	<p>NID DE SOUFFLURES</p>		<p>CLUSTERED POROSITY</p>
<p>2014</p>	<p>SOUFFLURES ALIGNÉES</p>		<p>LINEAR POROSITY</p>
<p>2015</p>	<p>SOUFFLURES ALLONGÉES</p>		<p>ELONGATED POROSITY</p>
<p>2016</p>	<p>SOUFFLURE VERMICULAIRE</p>		<p>WORM HOLE</p>
<p>2017</p>	<p>PIQÛRE</p>		<p>SURFACE PORE</p>
<p>2021</p>	<p>RETASSURE INTERDENDRITIQUE</p>		<p>INTERDENDRITIC SHRINKAGE</p>
<p>2024</p>	<p>RETASSURE DE CRATÈRE</p>		

GRUPE N° 3 - INCLUSIONS SOLIDES

301	INCLUSION DE LAITIER		SLAG INCLUSION
302	INCLUSION DE FLUX		FLUX INCLUSION
303	INCLUSION D'OXYDE		OXIDES INCLUSION
304	INCLUSION MÉTALLIQUE		METALLIC INCLUSION

GRUPE N° 4 - MANQUE DE PÉNÉTRATION

402	MANQUE DE PÉNÉTRATION		LACK OF PENETRATION
402	MANQUE D'INTERPÉNÉTRATION		LACK OF PENETRATION

GROUPE N° 5 - DEFAUTS DE FORME

5011	CANIVEAU		UNDERCUT
5012	MORSURE		UNDERCUT
5013	CANIVEAU A LA RACINE		SHRINKAGE GROOVE
502	SURÉPAISSEUR EXCESSIVE		EXCES WELD METAL
504	EXCÈS DE PÉNÉTRATION		EXCESSIVE PENETRATION
5041	GOUTTE OU EXCÈS LOCAL DE PÉNÉTRATION		EXCESSIVE PENETRATION
506	DÉBORDEMENT		OVERLAP
507	DÉFAUT D'ALIGNEMENT		LINEAR MISALIGNMENT
508	DÉFORMATION ANGULAIRE		ANGULAR MISALIGNMENT
509	EFFONDREMENT		SAGGING
511	MANQUE D'ÉPAISSEUR		INCOMPLETE FILLED GROOVE
515	RETASSURE A LA RACINE		ROOT CONVEXITY
516	ROCHAGE		POROSITY DUE TO CARBONE MONOXIDE
517	MAUVAISE REPRISE		

En fait : 3 grandes catégories de défauts

Défauts plans => = DEFATS NOCIFS

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

géométrie,CO₂...)

Défauts de forme=> =ACCERTEMENT DES EFFET D'ENTAILLE
(amorçage fissure fatigue, rupture brutale)

- caniveau, trop forte surépaisseur, effondrement,
manque de pénétration, ...

NF P 22471 définit 3 classes de critères d'acceptation selon le rôle et le niveau de sollicitation de l'élément dans la structure

Défauts volumiques => = DEFATS PEU NOCIFS

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



NF P 22471 définit des critères d'acceptation US & Radio pour en limiter le nombre

Menu

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

Processus de fissuration dans la zone **trempée** 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 et métal d'apport à minimiser, jouer sur la conception des assemblages..

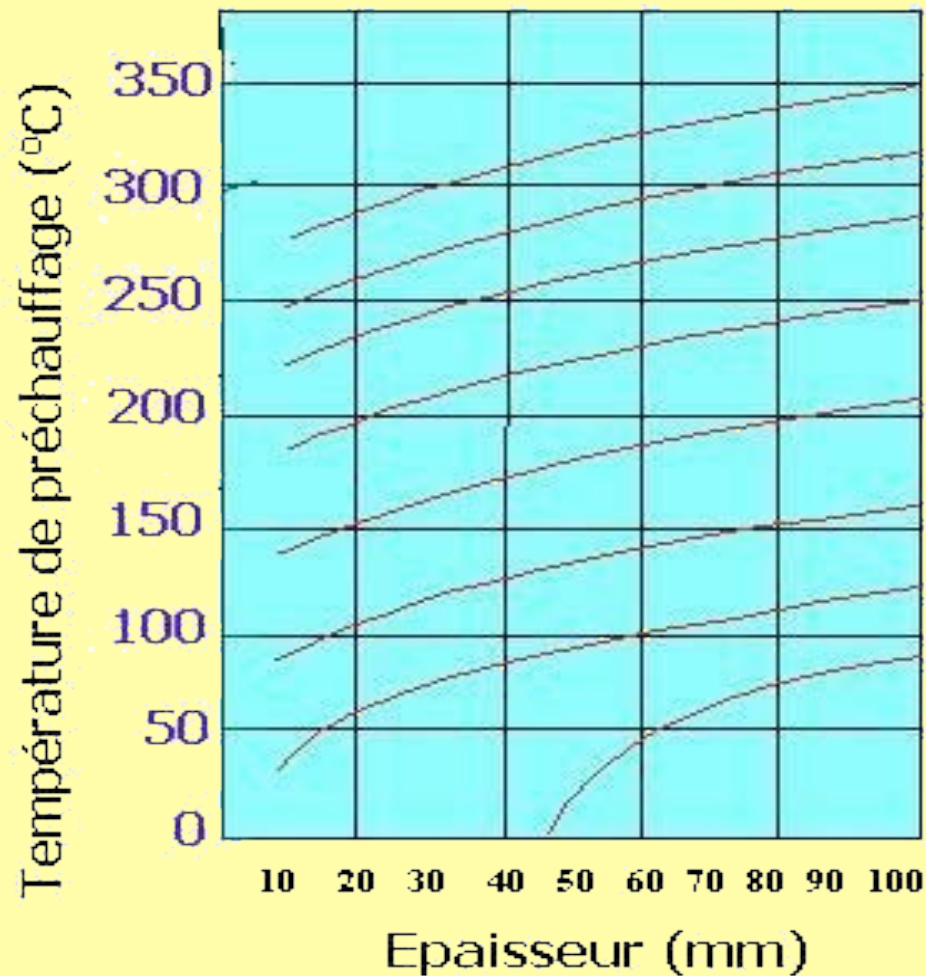
Réduction des risques de trempe locale: Choix métal (privilégier un CEV bas), adapter l'énergie de soudage, pré-chauffer voire post-chauffer le joint si nécessaire



5. ZOOM sur la fissuration à froid...

IIS doc.IX 646-69

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



Valeurs indicatives et robustes (acier CMn) à moduler en fonction :
- énergie de soudage,
- niveau de contraintes,
- teneur en H₂ électrodes

Menu

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

Fascicule N°66 du CCTG

Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier

NF-P22 470 (août 89)

Construction métallique-Assemblages soudés-
Dispositions constructives et justification des soudures

NF-P22 471(mars 84)

Construction métallique-Assemblages soudés-fabrication

NF- EN 288-3(juin 92) DMOS/QMOS

NF- P 22 472 (octobre 94) Construction métallique
Assemblages soudés-QMOS

NF- P 22 473(août 86) Construction métallique
Assemblages soudés-CND

NF-EN 287(juin92) Qualification soudeurs

& opérateurs



Menu

- 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'agréments des fournisseurs.**

Vérification des certificats matières (NF-EN 10025 mars 2005) et de la traçabilité physique.

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

Objectif : Se prémunir des risques de rupture fragile

S355K2 ép≤ 30mm

S355N 30<ép≤80mm

S355NL ép> 80mm

S420/460 N ép≤50mm

S420/460 NL ép>50mm



7. Les contrôles ou opérations de surveillance

-Qualification des Modes Opératoires de Soudage

Préalable: définir les classes de qualités requises Fasc 66 & 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 la NF-EN288-3 pour les généralité 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 A 88 111.

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

Magnéto

Radiographie

Ultrasons



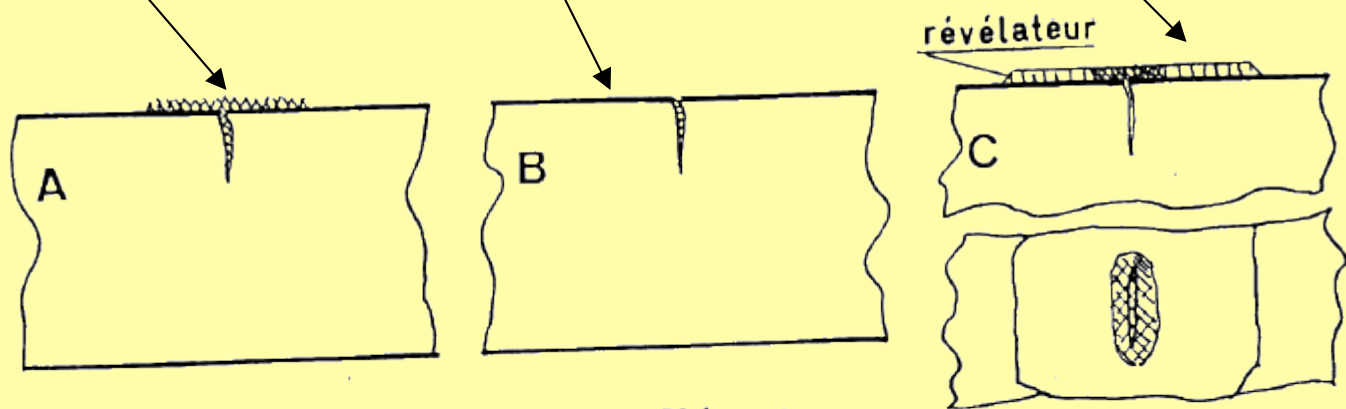
7. Les contrôles ou opérations de surveillance

Ressuage

liquide très fluide

nettoyage

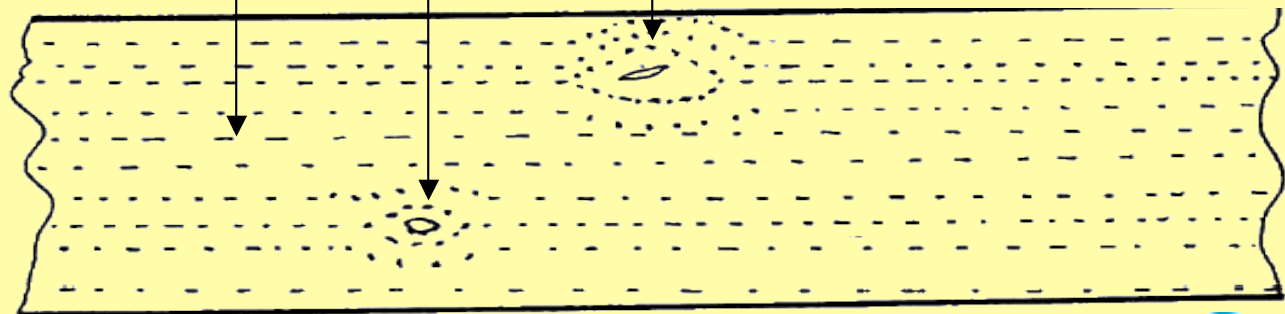
révélateur



poudre magnétique(suspension)

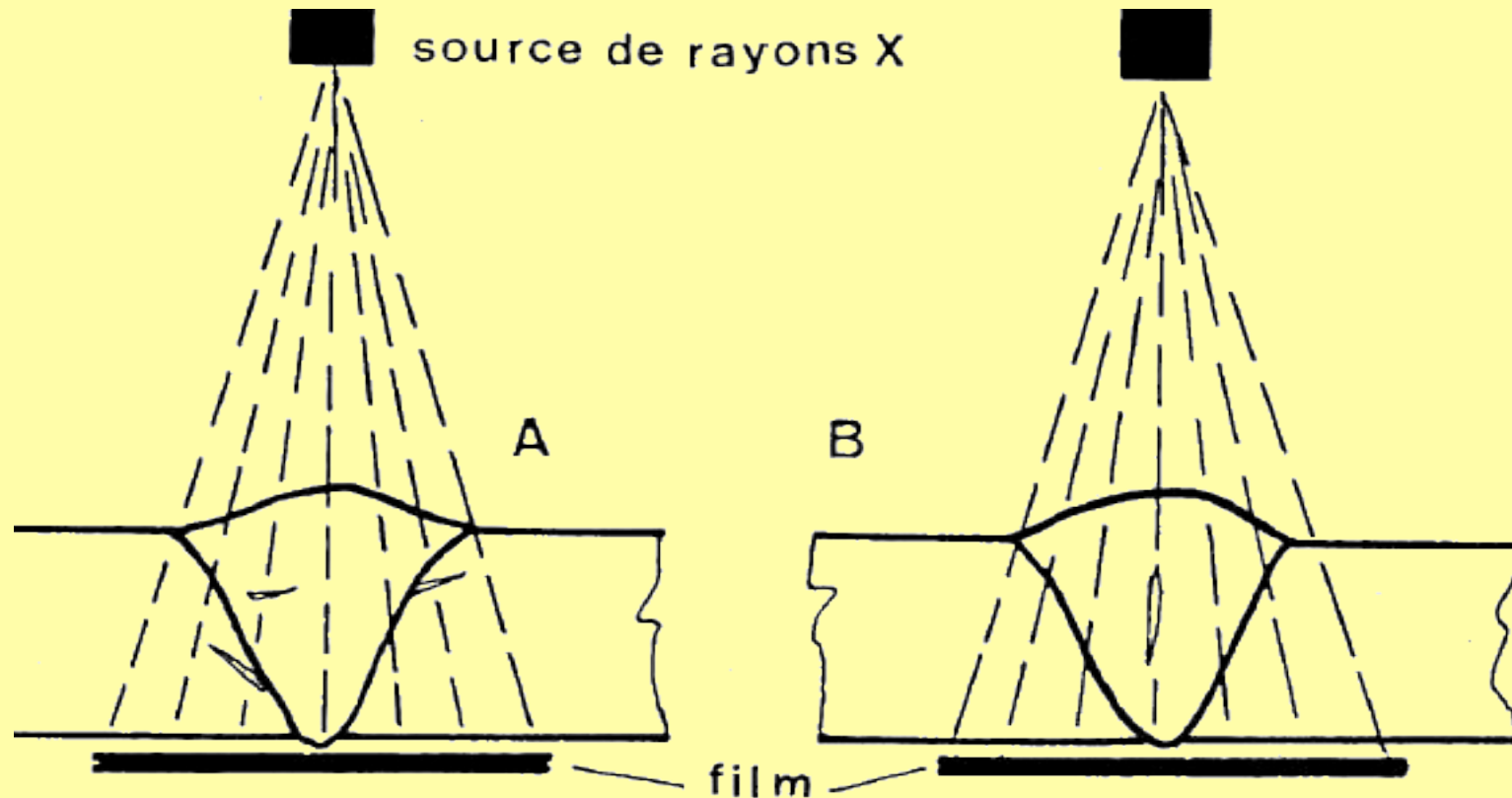
Si défaut=> répartition non uniforme

Magnétoscopie



7. Les contrôles ou opérations de surveillance

CND: 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



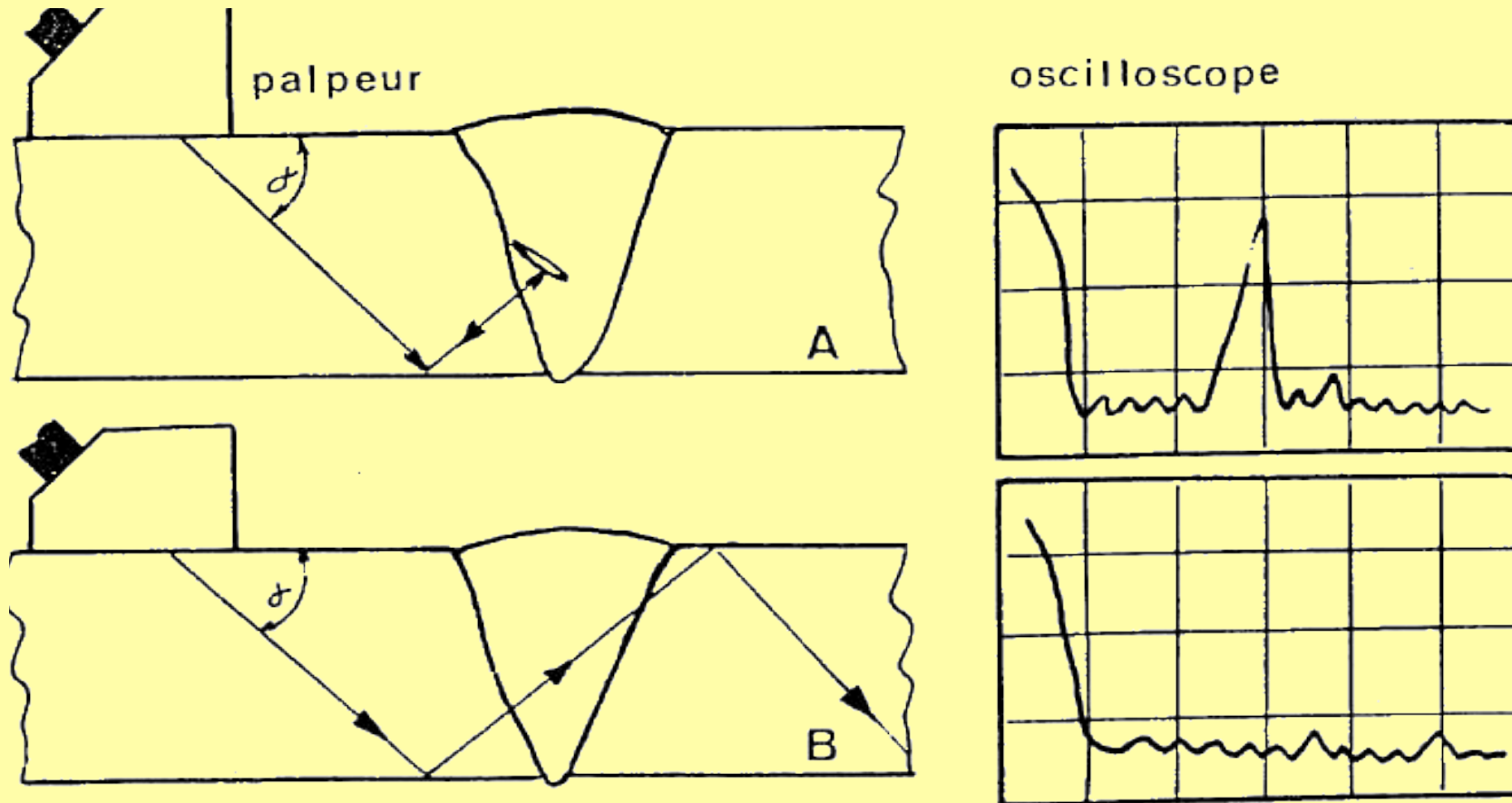
Appareil de radiologie
gamma



Radio X soudure virole

7. Les contrôles ou opérations de surveillance

CND: Ultrasons



Contrôle par ultrasons ; (A) : pièce avec défaut ; (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.





Merci pour votre attention