

Notions de soudabilité



Le soudage

Est la possibilité d'assembler plusieurs pièces entre elles afin de poursuivre sous l'effet de la chaleur la continuité :

- Mécanique
- Géométrie
- Chimique

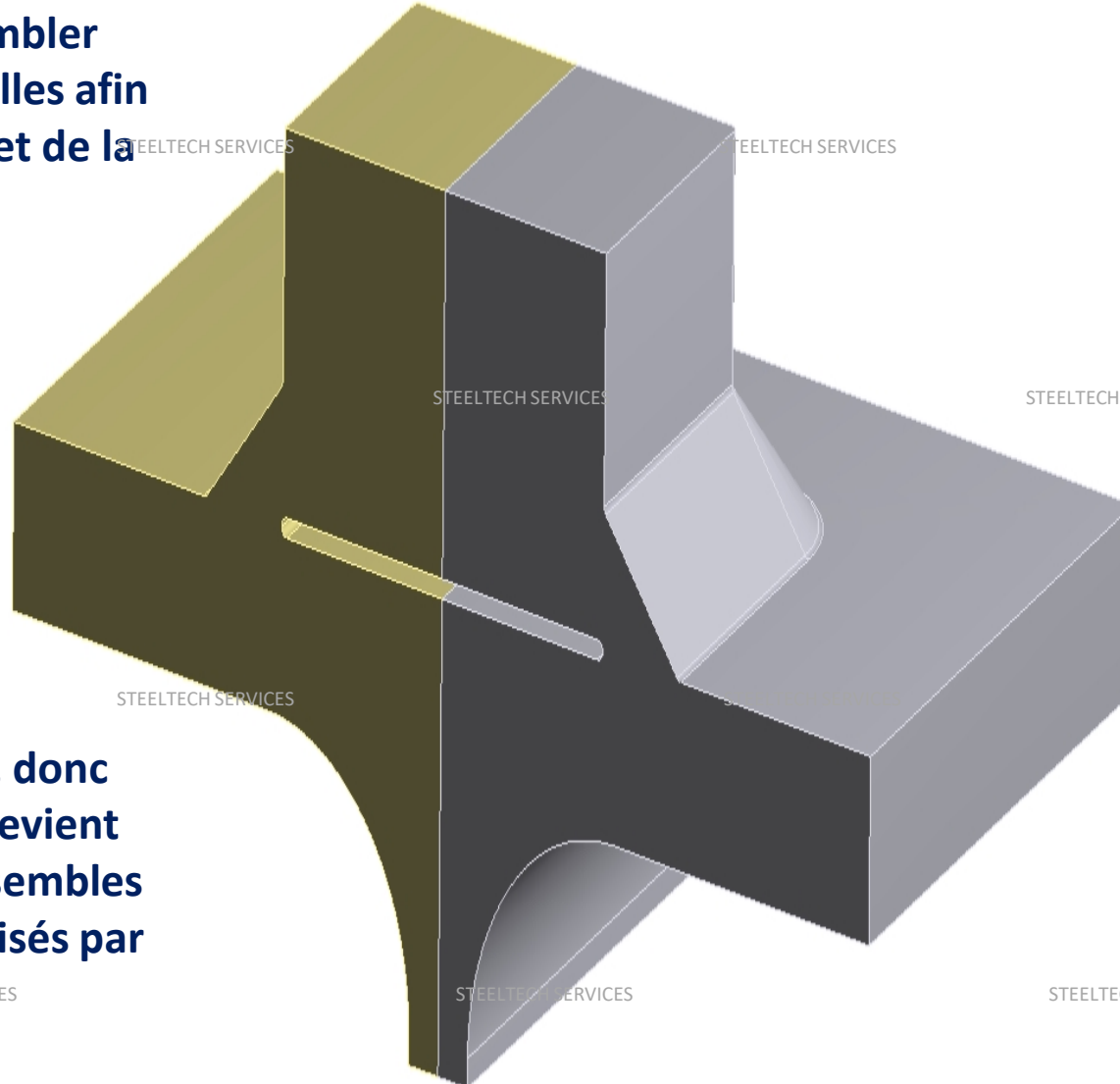
Va permettre :

- De gagner du temps, donc abaisser les prix de revient
- De fabriquer des ensembles ne pouvant être réalisés par d'autres moyens

Dans la réalisation d'un joint soudé, il ne faut surtout pas oublier l'aspect métallurgique lié directement au cycle thermique qu'engendre le soudage.

En effet le soudage est une mini opération de fonderie par sa localisation dans l'espace et dans le temps, cet aspect fait apparaître des contingences dues aux phénomènes physico-chimique qui se développent au sein du matériau métallique.

La métallurgie du soudage est devenue un élément essentiel de jugement lors de l'étude des constructions soudées.



Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

La soudabilité



La soudabilité représente pour un matériau considéré l'aptitude à réaliser un joint soudé répondant à des critères de qualité définis.

Soudabilité globale d'un matériau est une addition de la :

- **Soudabilité métallurgique**
- **Soudabilité constructive**
- **Soudabilité opératoire**

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

La soudabilité métallurgique

Elle relève de la composition chimique du matériau. Si nous nous limitons aux aciers qui sont des alliages “Fer-Carbone”, les additions volontaires ou involontaires des éléments influent sur les caractéristiques de l’acier considéré mais aussi sur sa soudabilité.

Tableau périodique des éléments chimiques

nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
 numéro atomique
 symbole chimique
 masse atomique relative (ou celle de l'isotope le plus stable)
 (IUPAC Atomic Weights 2013™ rev. 2015)

Métaux: Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métaux
 Non métaux: Autres non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés
 primordiaux, produits de désintégration d'actinides, synthétiques

Un acier possède au minimum 2 éléments dont le fer + le carbone.

Éléments d'alliages

- Mn Manganèse
- Cr Chrome
- Ni Nickel
- Mo Molybdène
- Cu Cuivre
- Si Silicium
- Al Aluminium

Éléments résiduels

- S Soufre
- P Phosphore
- Pb Plomb

Rôle des principaux éléments d'alliages

Éléments favorables

Le Carbone – C

- Augmente la résistance à la rupture Rm
- Augmente la dureté HV
- Il se combine avec d'autres éléments dont : Mn, Si, Cr, etc..
- Teneur maxi C =1,7%, sinon c'est de la fonte

Le Manganèse – Mn

- Améliore les caractéristiques mécaniques
- Il joue de rôle de désoxydant à teneur <2%
- Le rapport C/Mn est très important

Le Chrome – Cr

- Augmente le Rm des aciers faiblement alliés

Le Nickel – Ni

- Améliore les propriétés générales de l'acier

Éléments défavorables

Le Soufre – S

- Bas point de fusion et abaisse les résiliences

Le Phosphore – P

- Fragilise les aciers en augmentant la grosseur du grain

L'hydrogène – H

- Se dissout dans le métal en la fragilisant

L'azote – N

- Présent dans le métal de base et accélère le vieillissement
- Diminue l'allongement A% et la résilience KCV

L'oxygène – O²

- Soit dissout, soit sous forme d'oxydes
- Diminue sensiblement toutes les propriétés

d'un acier

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

Rôle des principaux éléments d'alliages

Éléments favorables

Le Molybdène – Mo

- Accroît la résistance à chaud de l'acier
- Améliore la fragilité si teneur de 1 à 1,25%

Le Cuivre – Cu

- Améliore la résistance à la corrosion
- Il entre dans la constitution des aciers à haute limite élastique si teneur < 0,5%

Le Silicium – Si

- Désoxydant et calmant
- Teneur en faible % car crainte de fissuration à chaud

L'aluminium – Al

- Effet calmant, affine le grain de la soudure
- Utilisé dans les aciers travaillant à basses températures si teneur < 1%

Éléments défavorables

L'arsenic – AS

- Phénomène de vieillissement

Rôles défavorables des principaux éléments d'alliages lors du soudage

Eléments défavorables

Le Soufre – S

- Il est à l'origine des soufflures et criques
- L'acier dit soudable si teneur $<0,04\%$ - Si plus élevé utilisation d'électrodes basique.

Le Phosphore – P

- Si teneur $<0,04\%$ - Aciers dits soudables si $S+P < 0,007\%$

L'hydrogène – H

- Peut provenir de l'humidité de l'enrobage des électrodes ou flamme oxyacétylénique
- S'échappe et crée des porosités et fissures

L'Oxygène – O²

- Sa teneur varie en fonction du procédé de soudage
- L'enrobage de l'électrode joue un rôle important

La soudabilité délicate

Dans un acier, il faut considérer l'influence simultanée de plusieurs éléments car la soudabilité est généralement le fait de l'apparition de zones de trempe, donc de zones fragiles avec pour conséquences, la formation de microcraques et microfissures.

Parmi les défauts que l'on peut trouver dans les soudures, le plus redouté est la craquelure ou la fissure qui peuvent conduire, lors de leur évolution en service, à la ruine de la construction. Or, les structures métallurgiques trempées sont sensibles à la fissuration et à la rupture fragile.

Il en résulte, que d'une manière générale, plus la trempabilité d'un acier est importante, plus sa soudabilité est délicate.



Dans les aciers au carbone et faiblement alliés, l'un des principaux éléments de trempabilité est le carbone. Les autres éléments en addition ont un effet plus ou moins prononcé.

Afin de mieux cerner l'influence conjuguée des éléments, une relation d'équivalence a été établie sous le nom de **“Carbone Equivalent – Ceq, CE ou CEV”**

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

Notion de carbone équivalent

Le "carbone équivalent" ou trempabilité globale d'un acier, liée à sa dureté sous cordon, cette caractéristique mécanique varie avec les transformations structurales. Pour des aciers dont la teneur en carbone est élevée il est indispensable de calculer le "carbone équivalent" qui prend en compte les éléments tels que : Cr, Mn, Mo, etc...

Il existe différentes formules de calcul de "carbone équivalent", mais en règle générale il faut que ce dernier soit inférieur à <0,42% si non il faudra prendre certaines précautions de soudage et notamment vérifier l'énergie de soudage mise en œuvre, qu'elle soit supérieure à $U \times I \times 60 / V_s = 2,7 \text{ KJ/cm}$.

(U = tension de l'arc en V, I = courant de soudage en A, V = vitesse de déplacement en mm/s)

Le durcissement d'un acier dans la zone thermiquement affectée est fonction des conditions de soudage pour une température d'une épaisseur initiale donnée.

Calcul du carbone équivalent :

$$\begin{array}{l} \text{CE} \\ C_{eq} \\ \text{CEV} \end{array} = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{(\% Cr + \% Mo + \% V)}{5} + \frac{(\% Ni + \% Cu)}{15} = <0,42\%$$

Carbone équivalent peut être abrégé en CE, Ceq, CEV

<0,42% bonne soudabilité
>0,42 à 0,70% nécessite un préchauffage
>0,70% difficilement soudable

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

Notion de carbone équivalent compensé

D'autre part il s'agit de définir le degré de soudabilité d'un produit en fonction de sa composition chimique et de sa masse, pour des pièces **de forte épaisseur**.

$$C_{ec} = C_e + 0,0254 \times (\text{épaisseur}/10)$$

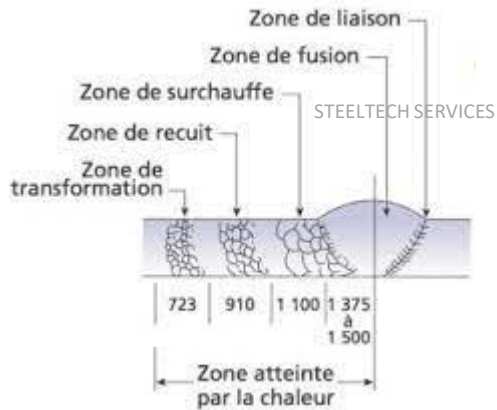
L'appréciation pratique du degré de soudabilité associé à une valeur donnée de carbone équivalent peut se faire sur la base du critère de dureté maximale sous cordon.

Mais quelque soit l'intérêt technique de cette notion, il ne s'agit plus ici d'une définition de l'acier mais d'une évaluation de ses possibilités de mise en œuvre en particulier le choix de la dureté maximale sous cordon acceptable dépendant du procédé de soudage, des conditions de sollicitation des joints pendant et après soudage, de la teneur en hydrogène du métal déposé.

PRECHAUFFAGE ET POSTCHAUFFAGE

Comme nous avons vu précédemment le soudage peut donner lieu à d'éventuels incidents ou des difficultés techniques, consécutifs à la formation de :

- Soit de zones de trempe dures et fragiles (aciers au C ou Cr-Mo)
- Soit au grossissement de grains, de précipitation de carbures complexes, donc de criques, dans les zones de liaison ou en pleine tôle, consécutives aux phénomènes pré-cités.



Il s'agit donc d'une propriété intrinsèque de l'acier qui ne pourra être définie qu'en fonction de la masse de cet acier, donc d'un assemblage type. En effet, le phénomène de trempe sera d'autant plus redoutable que la vitesse critique de trempe de ce matériau. Or, cette vitesse de refroidissement est fonction de la masse de l'acier, de l'énergie apportée par le soudage lui-même ou par une action extérieure. A égalité d'apport de chaleur c'est la pièce la plus massive (la plus épaisse) qui se refroidira le plus rapidement. La chaleur pourra s'y disperser plus vite.

Il est possible de ralentir la vitesse de refroidissement d'un joint soudé en lui fournissant avant soudage un apport complémentaire de chaleur. C'est le **PRECHAUFFAGE**

Industriellement les températures par rapport à l'ambiante (+20°C) varient de 30 à 100°C (c'est le dégourdissage), à 400°C voir 650°C pour les fontes. Il est nécessaire de poursuivre ce préchauffage durant le soudage et également après soudage par un **POSTCHAUFFAGE**

A défaut de postchauffage il n'est pas recommandé de refroidir les pièces brutalement. Il va falloir les protéger dans une enveloppe d'amiante, de laine de roche, de la vermiculite, etc.

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services. Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

Préchauffage



Attention !

Le préchauffage est proscrit sur les aciers fortement alliés dont :
Aciers inoxydables et réfractaires ainsi que sur les aciers à 13%Mn

En conclusions :

Le préchauffage a double buts :

- Diminuer l'effet de trempe
- Atténuer les tensions internes

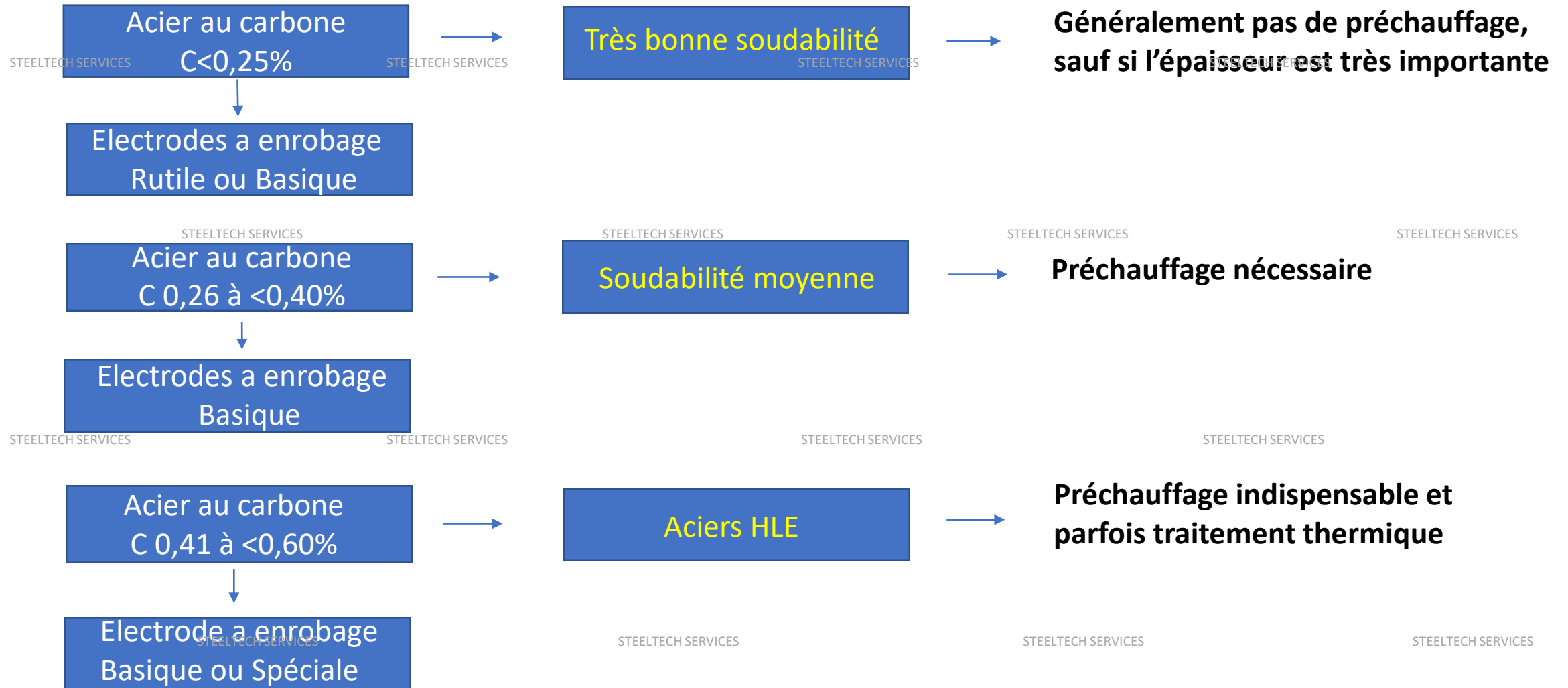
En aucun cas ce traitement ne modifiera la structure du métal de base ou de la soudure

La température du préchauffage à appliquer est déterminée par la formule :

$$T^{\circ}\text{Cp} = 350^{\circ}\sqrt{\text{Cec}-0,25}$$



Que retenir du préchauffage ?



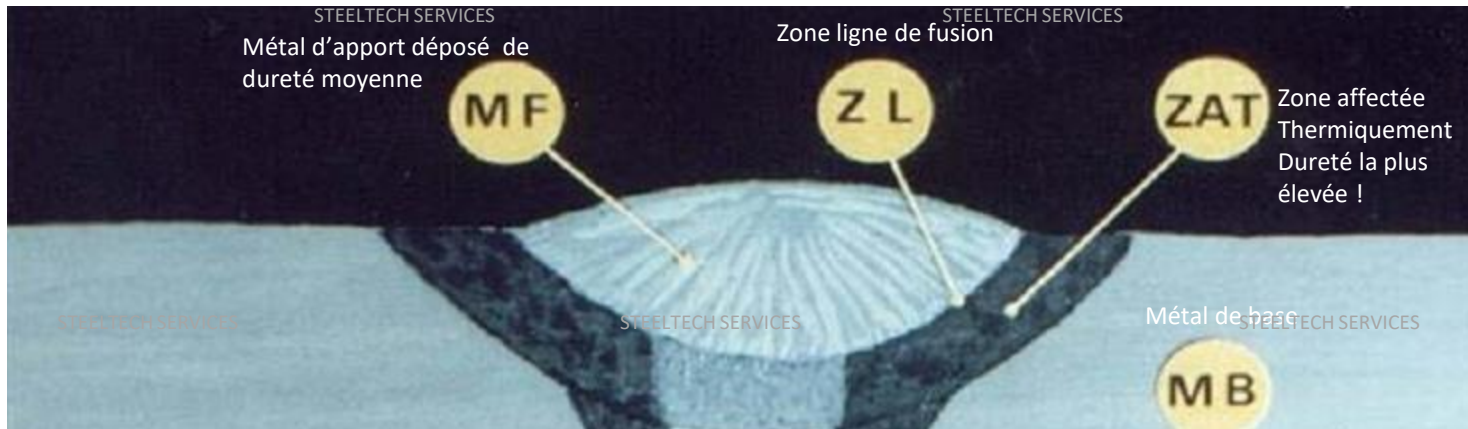
Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

Comment vérifier l'efficacité d'un préchauffage ?

Par échantillonnage de tôle d'épaisseurs et de nuances retenues pour la construction et de dimensions suffisantes pour se placer dans les conditions les plus proches possibles de la réalisation définitive, ceci pour tenir compte de l'inertie thermique.



Sur chaque échantillon exécuter un dépôt de soudure avec diamètres, nuances et paramètres identiques.

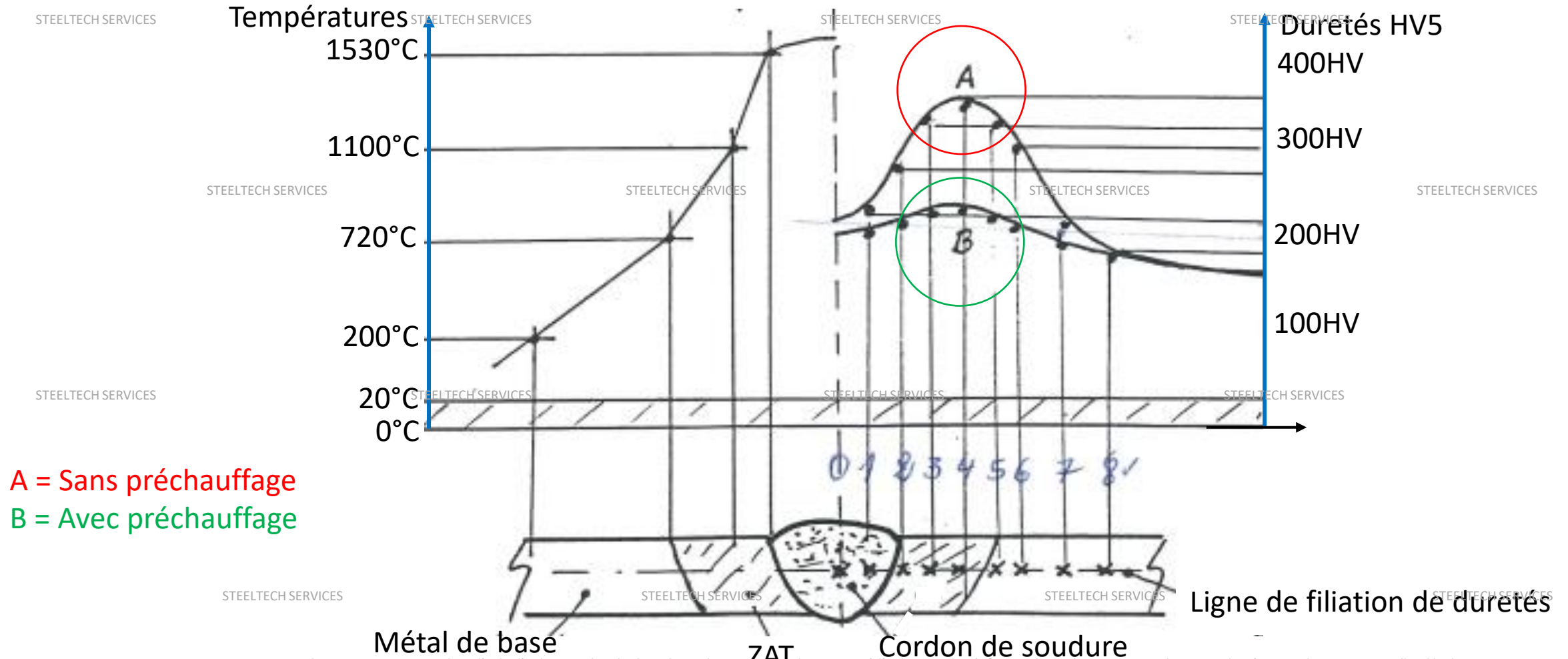
Après refroidissement effectuer une coupe macrographique et une filiation de dureté HV – (Vickers HV5)

MF = Dureté moyenne

ZAT = Dureté la plus élevée

MB = Dureté la moins élevée

Réalisation d'un assemblage avec et sans préchauffage



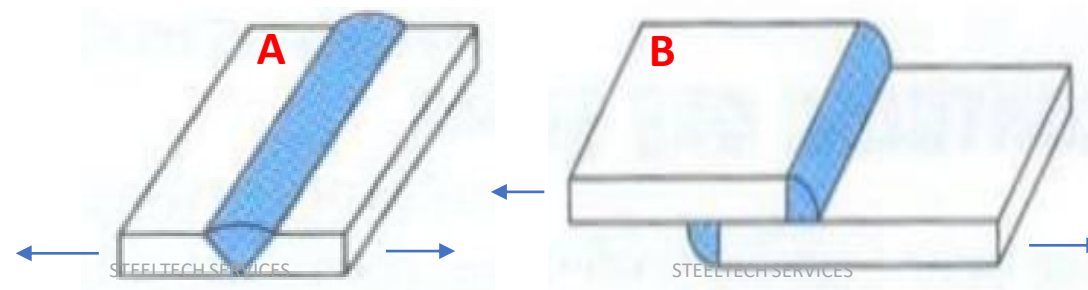
Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

La soudabilité constructive

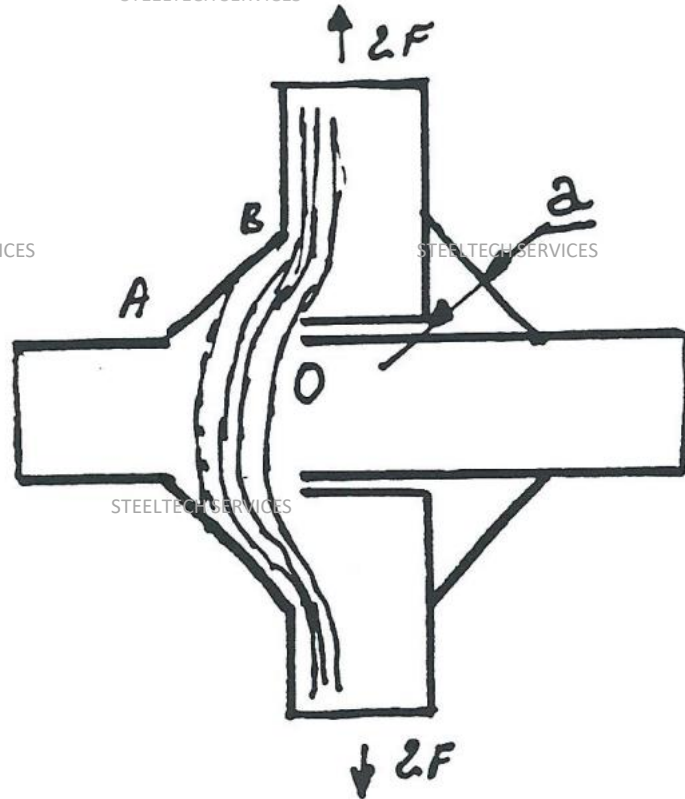
En plus des problèmes métallurgiques il faut tenir compte dans un assemblage soudé de la forme des pièces, de leur épaisseur, du type de joint, de la limite élastique des aciers ainsi que leur fragilité, quelque soit leur nature, les assemblages sont toujours le siège de perturbations dans la répartition des contraintes.



Seul l'assemblage **A** assure la continuité de forme et par la suite le parcours régulier des isostatiques sans déflexion. L'assemblage **B** contraint les isostatiques à s'infléchir, ce qui engendre des efforts secondaires.

De ce fait pour le cas des assemblages bout à bout aucun calcul n'est exigé.
Le calcul de la soudure est confondu avec celui de la pièce.

Pour le cas des soudures d'angles il en va différemment.



Cas d'un assemblage en croix, les soudures d'angle transversales caractérisées par une distribution plane des contraintes dont l'étude peut être faite par des méthodes analytiques ou par photoélastimètre.

L'équilibre est caractérisé par la répartition des contraintes suivantes :

- en **O** les contraintes sont à peu près nulles
- en **O-B** les concentrations de contraintes normales sont de l'ordre de :

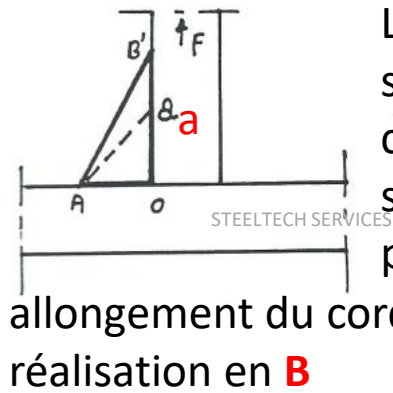
$$K = 3 \text{ à } 4 \frac{F}{a}$$



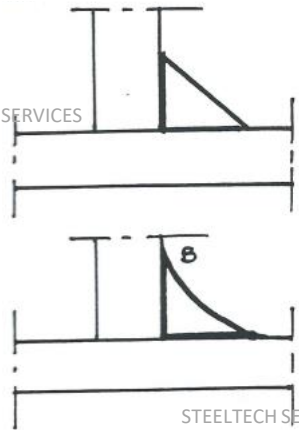
Cette concentration peut varier suivant les dimensions relatives des pièces et de la soudure. En outre les deux contraintes principales sont des signes contraires en **O** et de même en **B**, par suite sous des efforts élevés de glissements d'adaptation se produisent aisément à partir de **O**. En **B** l'adaptation est moins facile. Chaque détail de forme d'assemblage devrait donner lieu à une étude élastique spéciale.

Les états de contraintes d'un assemblage à clin par exemple sont très différents selon que le contact des pièces se fait sans jeu (réaction de contact équilibrant l'excentricité des attaches) ou avec jeu (solicitations importantes des soudures avant que les déformations aient mis les deux tôles en contact).

Influence des détails de forme des cordons

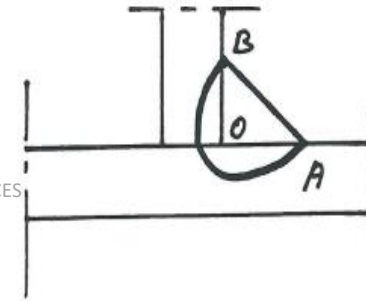


L'allongement du cordon de soudure dans le sens des efforts abaisse sensiblement les contraintes en **B**. Cependant l'exécution de soudures dissymétriques n'est pas de pratique courante (risque d'erreur à l'atelier, allongement du cordon dans le sens défavorable, difficultés de réalisation en **B**)



Les cordons couramment employés sont à base rectangle isocèle plat pour les constructions statiques.

En congés pour les constructions de fatigue (raccordement très progressif en **a** qui diminue l'effet d'entaille et augmente la sécurité) Il faut prohiber au contraire le cordon bombé dangereux à cause de l'effort d'entaille qu'il provoque.



La pénétration de la fusion, soit à la faveur d'un chanfrein, soit par emploi d'une électrode à forte pénétration diminue sensiblement les points de contraintes en **O** et **B**. A l'inverse un manque de fusion en **O** les augmente.

En résumé

En soudabilité constructive il faudra prendre en considération :

- La forme élémentaire et la masse des pièces
- La répartition des masses
- L'encastrement
- Le type de joint
- La capacité de la construction
- La limite d'élasticité du métal de base et du métal déposé
- La fragilité de l'acier ou de l'alliage de base

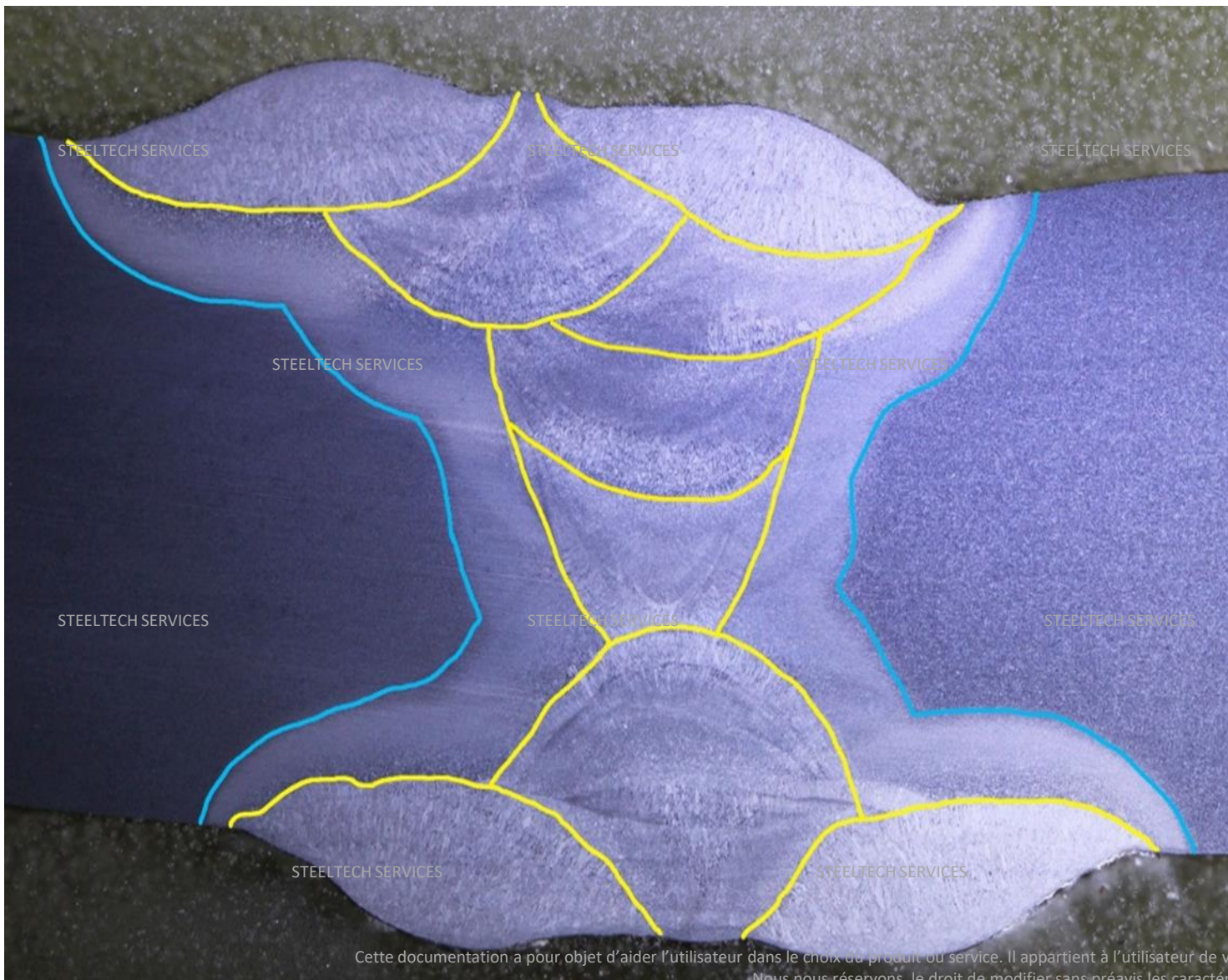
La soudabilité opératoire

STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES

STEELTECH SERVICES



C'est elle qui définit les possibilités de réalisation des soudures par le procédé de soudage choisi.

Dans l'essai de soudabilité opératoire, on cherche à définir le comportement du métal à la fusion.

- Recherche des paramètres de soudage
- Protection gazeuse ou solide (Argon-Hélium-CO²- flux électroconducteur, etc.)
- Aspect de la cristallisation (gros grains pour la soudure OA – état recuit des dépôts en multipasse)
- Examen de la compacité (soufflures-inclusions)
- Examen d'aspect (cordon-pénétration)
- Aspect de la disposition des passes et forme du dépôt par examen macrographique.

Cette documentation a pour objet d'aider l'utilisateur dans le choix du produit ou service. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que le produit ou service choisi est adapté aux applications auxquelles il le destine.

Nous nous réservons le droit de modifier sans préavis les caractéristiques de ses produits et services.

Les descriptions, illustrations et caractéristiques sont fournies à titre indicatif et ne peuvent engager la responsabilité de notre société

Conclusions

Georges WENDERS

Expert International en Anti-Usure Minérale

CEO – STEELTECH SERVICES SPRL



Le soudage est une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant deux pièces.

Il faut connaître les matériaux pour les souder de façon efficace et en respectant des cahiers des charges et modes opératoires précis.

Cette connaissance est d'autant plus cruciale que l'ouvrage sera fortement sollicité.