



**HAL**  
open science

## Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions

Jean-Paul Dichtel

► **To cite this version:**

Jean-Paul Dichtel. Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions. Mottin, Stéphane and Lelièvre, Gérard. Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions, 18, MRCT-CNRS, pp.61-73, 2011, Intégrations des savoirs et des savoir-faire, 978-2-918701-04-0. 10.5281/zenodo.400482 . hal-01472126

**HAL Id: hal-01472126**

**<https://hal.science/hal-01472126>**

Submitted on 24 Mar 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

[Cliquer sur le sommaire pour parcourir plus vite ce document.](#)

<b><u><a href="#">Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions</a></u></b> .....	<b>67</b>
<b><u><a href="#">1 – Caractérisation mécanique des aciers</a></u></b> .....	<b>67</b>
<u><a href="#">1 – 1. Essai de traction</a></u> .....	67
<u><a href="#">1 – 2. Essai de flexion par choc</a></u> .....	69
<u><a href="#">1 – 3. Essai de dureté</a></u> .....	70
<b><u><a href="#">2 – Métallurgie des aciers et superalliages</a></u></b> .....	<b>71</b>
<u><a href="#">2 – 1. Métallurgie des aciers</a></u> .....	71
<u><a href="#">2 – 2. Les aciers alliés</a></u> .....	74
<u><a href="#">2 – 3. Les aciers inoxydables</a></u> .....	75
<u><a href="#">2 – 4. Les superalliages</a></u> .....	76
<b><u><a href="#">3 – Commentaires : la directive européenne appareils à pression</a></u></b> .....	<b>76</b>

Liens : <https://doi.org/10.5281/zenodo.400482>

<http://www.sudoc.fr/155436619>

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01472126>

<https://hal.archives-ouvertes.fr/INTEGRATIONS/page/materiaux-et-joints-etancheite-pour-les-hautes-pressions>

<https://zenodo.org/communities/integrations>

### Référence au format BibTeX :

```
@inbook{6materiaux18_2011,
location = {Meudon},
edition = {{3e éd.}},
title = {Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions},
isbn = {978-2-918701-04-0},
url = {http://www.sudoc.fr/155436619},
series = {Intégrations [des savoirs et des savoir-faire]},
abstract = {Préface / Dominique Leguillon P. 17. Introduction générale / Patrick Boissinot, Patrick Langlois, Agílio A.H. Pádua P. 21. Introduction au dimensionnement / Agílio A.H. Pádua 1 — Définition du problème 2 — Dimensionnement 3 — Obturateurs 4 — Conclusion P. 31. Fretage et autofretage / Patrick Langlois 1 — Considérations préliminaires au fretage 2 — Fretage d'une enceinte bloc 3 — Fretage d'une enceinte multibloc 4 — Formulation de l'autofretage 5 — Modes de réalisation de l'autofretage 6 — Conclusion P. 55. Méthodes d'éléments finis en calcul de structures élastiques / Joël Frelat 1 — Introduction 2 — Rappel de la formule théorique 3 — Formulation variationnelle 4 — Formulation numérique 5 — Etapes d'une mise en œuvre pratique 6 — Conclusion — Extension aux problèmes non linéaires P. 65. Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions / Jean-Paul Dichtel 1 — Caractérisation mécanique des aciers 2 — Métallurgie des aciers et superalliages 3 — Commentaires : la Directive Européenne Appareils à Pression P. 77. Les métaux non ferreux – Alliage cuivre-béryllium et titane / Jean-Pierre Petitot 1 — Introduction 2 — Le cuivre-béryllium 3 — Le titane P. 85. Les Carbures cémentés (WC)-Co / Emmanuel Pauty 1 — Les procédés de fabrication 2 — Les propriétés des carbures cémentés 3 — Conclusions P. 99. Choix et usinage des carbures de tungstène / Jacques Calzas 1 — Choix des carbures de tungstène 2 — Usinage du carbure de tungstène P. 111. Céramiques et matériaux pour l'optique / Jean-Claude Chervin 1 — Céramiques 2 — Matériaux pour l'optique P. 141. Types de joints et de montage / Roger Argoud et Jacques Roux 1 — Introduction 2 — Généralités 3 — Joints à basse pression 4 — Joints cône sur cône 5 — Joints Bridgman Champignon 6 — Joints annulaires auto-serrés 7 — Joints coniques d'Amagat 8 — Autres joints 9 — Conclusion P. 161. Joints hautes pressions pour la compression de gros volumes solides / Sylvie Le Floch 1 — Joints solides utilisés dans les différents types d'enceintes hautes pressions 2 — Matières premières des joints 3 — Assemblages (HP)-(HT) P. 173. Le matériel standard / Jean-Pierre Petitot 1 — Tubes, conduites et raccords 2 — Les vannes 3 — Quelques types d'enceintes commercialisées 4 — Les générateurs de pression 5 — Le matériel moins standard P. 187. Assemblages haute pression / Gérard Hamel 1 — Montage des raccords de pressions 2 — Montage de quelques passages électriques 3 — Les passages de thermocouple 4 — Les passages optiques, montage des fenêtres 5 — Montage des joints et des obturateurs sur une cellule haute pression P. 197. Usinage / Jean-Pierre Michel 1 — Introduction 2 — Les joints de faible épaisseur 3 — Les bagues anti-extrusion à 45° 4 — Les joints à 45° 5 — Les joints « double Bridgman » 6 — Les joints plats en élastomères 7 — Les joints en indium (étanchéité en hélium et azote liquide 8 — Joints métal-métal type Lens ring 9 — Les passages du courant 10 — Usinage de matériaux exotiques P. 211. Les règles de sécurité / Patrick Boissinot 1 — Dangers présentés par les appareils à pression 2 — Appareils à pression rencontrés dans les laboratoires et facteurs de risques 3 — Principes généraux de prévention et réglementation 4 — Moyens de protection 5 — Conclusion},
pages = {61–73},
number = {18},
booktitle = {Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions},
publisher = {{MRCT}-{CNRS}},
author = {Dichtel, Jean-Paul},
bookauthor = {Boissinot, Patrick and Langlois, Patrick and Pádua, Agílio},
editor = {Mottin, Stéphane and Lelièvre, Gérard},
editorb = {Mottin, Stéphane},
editorbtype = {redactor},
date = {2011},
langid = {french},
keywords = {Hautes pressions -- Matériaux, Joints d'étanchéité, Matériaux -- Effets des hautes pressions}, doi = {10.5281/zenodo.400482},
}
```

# Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions

*Jean-Paul Dichtel*

Ingénieur à la Direction Technique  
Aubert & Duval Holding  
22 rue Henri Vuillemin B.P. 63  
92233 Gennevilliers Cedex

## 1 – Caractérisation mécanique des aciers

### 1 – 1. Essai de traction

**Description de l'essai.** L'essai de traction fait l'objet des normes de la série EN 10.002. En imposant des efforts de traction à une éprouvette calibrée, et en mesurant les déformations résultantes, il est obtenu la courbe de la figure 1. La première partie de la courbe est sensiblement rectiligne. Il s'agit de la droite de Hooke, qui couvre le domaine élastique, où :

- les déformations sont faibles et proportionnelles aux contraintes,
- la suppression de la force entraîne le retour à la longueur initiale de l'éprouvette : déformation rémanente (permanente) nulle.

C'est le domaine normal et classique de l'utilisation des aciers. Dans la seconde partie de la courbe, le métal a un comportement plastique :

- les déformations sont importantes et ne sont plus proportionnelles aux contraintes,
- en cas de suppression de l'effort, il subsiste une déformation rémanente, malgré le retour selon une droite parallèle à celle de Hooke (retour élastique),
- la structure du métal a évolué :  
glissement relatif des plans atomiques, apparition de défauts de structure, orientation des plans atomiques dans le sens de la déformation.

Ces propriétés de plasticité sont utilisées pour :

- la mise en forme des métaux : emboutissage, formage, pliage, cambrage...
- l'absorption d'énergie : caisson de déformation des véhicules,
- la structure des engins à usage unique, missiles, etc.

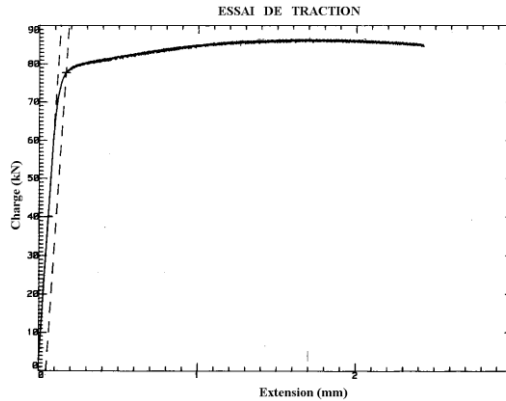


Figure 1 – Courbe de traction.

Dans la troisième partie de la courbe, la force décroît et une instabilité apparaît au niveau de l'éprouvette : la striction, déformation intense et localisée, où se produit la rupture.

L'essai est conduit sur une machine de traction, qui impose les efforts, mesure les déformations, trace la courbe et pour les machines informatisées, détermine les paramètres.

L'éprouvette de traction est un solide géométrique qui comporte :

**une partie « calibrée »**, à section constante, dont la surface sert de base aux calculs de contraintes.

**les têtes**, qui servent à l'arrimage dans les mors de la machine. Elles sont d'une section nettement plus importante.

**Paramètres déterminés.** L'essai de traction permet d'accéder aux paramètres suivants :

**Le module d'élasticité.** C'est la déformation sous contrainte du métal, selon la pente de la droite de Hooke. Ce module s'exprime par :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{avec} \quad \sigma = \frac{F}{S_0} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \frac{dl}{l_0}$$

où E est le module d'élasticité (N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma$  la contrainte (N/mm<sup>2</sup>),  $\varepsilon$  la déformation relative, F la force (N),  $S_0$  la surface initiale de la section de l'éprouvette en mm<sup>2</sup>, dl la déformation (mm) et  $l_0$  la longueur initiale de l'éprouvette (mm).

**La limite d'élasticité.** C'est la contrainte limite entre les domaines élastique et plastique. Elle est difficile à déterminer directement sur la courbe. On utilise la limite conventionnelle à 0,2% d'allongement rémanent. Une parallèle à la droite de Hooke, à 0,2% d'allongement est tracée. L'intersection avec la courbe de traction détermine la limite d'élasticité.

$$Rp_{0,2} = \frac{Fp_{0,2}}{S_0}$$

où  $Rp_{0,2}$  est la limite d'élasticité à 0,2% (N/mm<sup>2</sup>)

et  $Fp_{0,2}$  la force à la limite d'élasticité (N).

**La charge de rupture :** c'est la contrainte maximale supportée par le métal.

$$Rm = \frac{Fm}{S_0}$$

où  $R_m$  est la charge de rupture en (N/mm<sup>2</sup>) et  $F_m$  la force maximale supportée (N).

**Les allongements à rupture** : ces allongements sont mesurés à l'aide de repères tracés sur la partie calibrée de l'éprouvette.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

où  $A$  est l'allongement à rupture,  $L_0$  la longueur initiale (mm), avec  $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$  et  $L_u$  est la longueur ultime, après rupture (mm), qui est mesurée par raboutage des deux extrémités.

**Le coefficient de striction** : il exprime l'intensité de la réduction de section au niveau du front de rupture.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100$$

où  $Z$  est le coefficient de striction et  $S_u$  la surface de section de l'éprouvette, à l'endroit de la striction.

Tableau 1 – Valeurs typiques de propriétés obtenues lors d'essais de traction.

	E - N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> - N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p</sub> - N/mm <sup>2</sup>
Acier doux	210.000	340	220
Acier dur	210.000	690	370
Superalliage PYRAD 53 NW	200.000	1360	1220
Acier allié 819 B	210.000	1850	1400

**Commentaires.** Le module et la limite d'élasticité sont des paramètres qui permettent le dimensionnement des pièces mécaniques, par les calculs de résistance des matériaux. La charge de rupture, les allongements et la striction, ne sont pas classiquement dimensionnants. Ils donnent néanmoins des indications sur la ductilité du métal. L'essai de traction permet en outre de déterminer d'autres paramètres :

- le coefficient de Poisson ou module transversal : rapport de l'allongement par le rétrécissement de la section, dans le domaine élastique. Ce module est constant pour un matériau donné, soit 0,30 pour l'acier et les superalliages. Il constitue également un paramètre dimensionnant.
- le coefficient d'érouissage  $n$  : NFA 03-659.

Enfin l'essai de traction peut être réalisé à température supérieure à l'ambiante : le principe de l'essai reste le même. La norme NF EN 10.002-5 définit seulement les précautions particulières afférentes à la mise en température de l'éprouvette.

## 1 – 2. Essai de flexion par choc

**Description de l'essai.** Cet essai est couvert par la Norme EN 10.045-1. Il consiste à mesurer l'énergie de rupture par choc d'un barreau de 10 x 10 mm, entaillé. Deux sortes d'entailles existent, principalement :

**l'entaille en U, essai KU** : entaille de 5 mm de profondeur arrondie  $r = 1$  mm en son extrémité,

**l'entaille en V, essai KV** : entaille aiguë, en forme de V, de 2 mm de profondeur

Le choc est prodigué par un « mouton pendule de Charpy ». L'énergie de rupture est appréciée simplement par la hauteur de remontée du pendule après le choc. Cette énergie définit la résilience du métal, ou résistance au choc.

**Expression de la résilience.** L'énergie de rupture, en Joules, est associée à la forme de l'entaille : respectivement KU et KV.

**Commentaires.** L'essai de résilience n'est pas dimensionnant. Il ne permet pas de calculer une pièce, qui doit travailler au choc. Il est simplement un indicateur relatif de la fragilité ou de la ductilité d'un matériau.

Par exemple :

- à  $KV < 20$  J, le métal est inutilisable,
- à  $20 \text{ J} < KV < 50$  J, le métal est fragile mais utilisable moyennant quelques précautions,
- à  $KV > 50$  J, le métal est peu fragile, en usage courant.

L'essai KV peut être pratiqué à des températures différentes de l'ambiante, généralement à basse température. Il s'agit de déterminer la température de transition ductile/fragile des métaux. Plus elle se situe à basse température, plus le matériau est ductile.

### 1 – 3. Essai de dureté

**Principe de l'essai.** Il s'agit de mesurer l'enfoncement d'un pénétrateur à la surface du métal, sous l'action d'une force connue. Plus l'enfoncement est faible, plus le métal est dur. A l'inverse, un grand enfoncement est signe d'un métal mou.

#### Types d'essais.

##### Essai Brinell - NF EN 10.003-1

- pénétrateurs: bille en acier dur ou carbure de Tungstène,
- bille  $\varnothing$  10 mm sous 3000 kg, pour le plus classique ; billes jusqu'à  $\varnothing$  2,5 mm, sous charges plus réduites,
- après essai, mesure du diamètre de l'empreinte,
- cotation de la dureté d'après tables,
- symbole : HBS acier ou HBW carbure.

##### Essai Rockwell - NF EN 10.019-1

- pénétrateur : bille en acier dur : HRb, ou cône de diamant : HRc,
- deux charges sont successivement appliquées : pré-charge de 98 N (HRb) ou 147 N (HRc) ; charge de 981 N (HRb) ou 1470 N (HRc),
- la dureté est mesurée automatiquement par l'enfoncement relatif entre charge et pré-charge.

##### Essai Vickers - NFA 03-154

- pénétrateur : pyramide à base carrée, en diamant,
- charge : adaptable de 49 à 980 N, en fonction des conditions de l'essai : taille de l'empreinte tolérable, possibilité d'une lecture correcte, spécification,
- mesure de la diagonale de l'empreinte et détermination de la dureté par application d'une table de correspondance,

- symbole : HV + charge appliquée,
- existence de dureté Vickers sous charge réduite (2 à 49 N) (norme NF A 03-163), voire de microdureté sous microscope, qui utilise des charges inférieures au Newton.

**Commentaires.** Les duretés élevées se mesurent de préférence avec les pénétrateurs diamant. Les billes en métal se détériorent au contact de métaux trop durs.

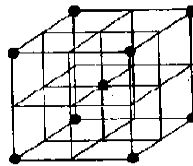
Il existe des tables d'équivalences approximatives entre :

- les 3 systèmes de mesure des duretés : NFA 03-172,
- la dureté et la charge de rupture d'un acier : NFA 03-173.

## 2 – Métallurgie des aciers et superalliages

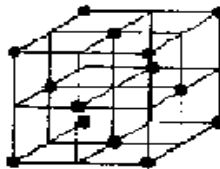
### 2 – 1. Métallurgie des aciers

**Généralités.** Ce sont les alliages fer - carbone, jusqu'à 2,0% C. Au-delà, il s'agit de fonte. Le fer se présente sous deux formes allotropiques :



#### Le fer $\alpha$

- cristallise dans le système cubique centré (CC) : un atome à chaque sommet du cube, un au centre,
- phase stable de l'ambiante jusqu'à 906°C,
- magnétique (jusqu'à 768°C, point de Curie),
- forme avec le carbone une solution solide d'insertion de petite taille, se dilate peu,
- la ferrite dissout peu de carbone.



#### Le fer $\gamma$

- cristallise dans le système cubique faces centrées (CFC) : un atome à chaque sommet du cube et un atome au centre de chaque face,
- phase stable de 906°C jusqu'aux abords du point de fusion (1528°C),
- amagnétique,
- la solution solide d'insertion avec le carbone est nommée austénite,

« Intégrations des sav



- l'austénite dissout des quantités importantes de C : jusqu'à 1,7%, au maximum, à 1145°C, l'austénite est plus compacte que la ferrite : au chauffage, la transformation  $\alpha \rightarrow \gamma$ , se signale à 906°C, par une contraction. A l'inverse, au refroidissement, une dilatation se produit.

**Le diagramme fer-carbone.** Le diagramme, ci-dessous, précise les phases qui existent dans un acier à l'état d'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire pour des évolutions thermiques extrêmement lentes : de l'ordre de 50°C /heure au maximum au refroidissement. Le diagramme permet de prévoir les transformations suivantes :

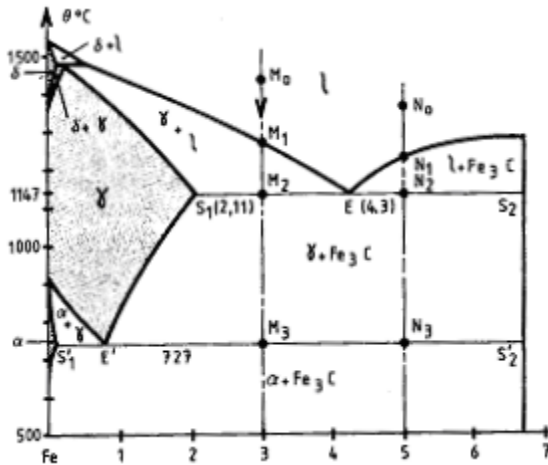


Figure 2 – Diagramme de phases fer/carbone.

- **Acier à moins de 0,03 % carbone**

Liquide  $\rightarrow$  austénite  $\rightarrow$  ferrite.

Le carbone contenu ne dépasse pas la solubilité de l'austénite et de la ferrite. Il y a simple transformation allotropique. L'acier ainsi obtenu est qualifié de doux, car ses caractéristiques mécaniques sont faibles.

- **Acier à carbone compris entre 0,03 et 0,8%.**

Liquide  $\rightarrow$  austénite  $\rightarrow$  ferrite + austénite  $\rightarrow$  ferrite + perlite.

L'austénite issue du liquide, est apte à dissoudre tout le carbone présent. Au début de la transformation, il se produit un équilibre ferrite/austénite. La ferrite ne dissolvant que très peu de carbone, celui-ci se concentre par diffusion dans l'austénite. (*Diffusion : déplacement d'atomes au sein d'un métal solide*).

A 727°C, l'austénite se transforme en perlite, eutectoïde, composé de lamelles alternées de ferrite et de carbure de fer, ( $Fe_3C$ ). La perlite présente une teneur constante en carbone, de l'ordre de 0,8 %.  $Fe_3C$ , nommé cémentite, est un composé très dur.

Un acier à 0,8 % C est entièrement perlitique. Les aciers perlitiques sont des aciers durs, à caractéristiques mécaniques élevées.

- **Acier à carbone compris entre 0,8 et 1,7 %.**

Liquide → austénite → austénite + cémentite → perlite + cémentite

La diminution de la solubilité du carbone dans l'austénite provoque la formation de cémentite primaire, en équilibre avec la matrice austénitique.

**La transformation martensitique.** La trempe consiste à refroidir très rapidement le métal, par immersion dans un fluide réfrigérant : eau, huile, voire air calme ou soufflé. De cette manière, les équilibres décrits précédemment n'ont pas le temps de s'opérer. Ceux-ci se produisent par diffusion, qui demande un temps non négligeable pour se produire. La transformation martensitique s'effectue par cisaillement, déplacement simultané à courte distance d'alignement d'atomes, à une vitesse proche du son. La structure obtenue est quadratique (parallélépipédique). La martensite  $\alpha'$  est très désordonnée, et ne permet pas facilement les glissements d'atomes et donc la déformation plastique. Elle est caractérisée par :

- une grande dureté,
- des résistances et limites d'élasticités élevées,
- des allongements à rupture et strictions très réduits,
- une résilience faible.

Le désordre de la structure, et par conséquent la dureté, augmentent avec la teneur en carbone. Pour un acier trempé, les caractéristiques sont typiquement les suivantes :

- à 0,1 % C,  $R_m = 1000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{p0,2} = 800 \text{ N/mm}^2$ ,  $A = 15\%$ ,
- à 0,4 % C,  $R_m = 1900 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{p0,2} = 1500 \text{ N/mm}^2$ ,  $A = 10\%$ ,
- à 0,8 % C,  $\Delta = 60 \text{ HRc}$ ,  $R_m > 2100 \text{ N/mm}^2$ ,  $A = 0 \text{ à } 2\%$ .

La transformation martensitique n'est pas exempte de risques de déformations voire même de fissurations (tapures). Les mécanismes sont les suivants :

- réaction à basse température :  $M_s$ , ou point « Martensite Start » se situe généralement à environ  $200^\circ\text{C}$ .
- gonflement : la transformation  $\gamma \rightarrow \alpha'$  se produit avec un gonflement d'environ 1%.

La transformation des couches internes du métal met en traction la surface, qui est froide, transformée soit donc dure et très fragile.

Ces contraintes peuvent provoquer des déformations, voire dépasser la charge de rupture. Il se produit alors une fissuration ou tapure de trempe. Les pièces rompues sont alors inutilisables.

**Les traitements thermiques.** Il existe les trois types principaux suivants :

**le recuit :** L'acier est chauffé jusqu'à la température de l'austénite. Après un maintien à température pour homogénéisation, l'acier est refroidi lentement : indépendamment de l'état de l'acier à l'origine, la structure est alors du type ferrito-perlitique, c'est-à-dire aussi douce que possible.

**la trempe :** L'acier est austénitisé comme précédemment puis refroidi rapidement par immersion dans un fluide.

**le revenu :** La structure martensitique précédente est réchauffée :

de  $20 \text{ à } 200^\circ\text{C}$ , il y a relaxation des contraintes internes de trempe.

de  $200^\circ\text{C}$  à  $650^\circ\text{C}$ , il y a retour progressif de la structure vers l'équilibre, par : formation de cémentite ; régénération de la ferrite,

Il n'est généralement pas pratiqué de revenu entre 200 et 500°C, car il peut en résulter une fragilité.

**Commentaires.** Les traitements thermiques permettent d'obtenir une grande variété, pour le même acier, de caractéristiques mécaniques :

- métal doux et très ductile à l'état recuit,
- métal dur et assez ductile à l'état trempé et revenu entre 500 et 600°C,
- métal très dur, mais utilisable à l'état trempé et revenu à 150–200°C.

## 2 – 2. Les aciers alliés

**Présentation.** Outre le fer et le carbone, les aciers du commerce comportent des taux variables d'impuretés, dont les principales sont : Si, Mn, S, P. Il peut être également fait des additions volontaires, principalement de Cr, Ni, Mo et V. Pour un acier allié, la teneur massique de chaque élément ne dépasse pas 5 %. L'objectif de ces additions est :

- d'augmenter les caractéristiques mécaniques,
- d'obtenir une meilleure réponse à la trempe (trepabilité),
- de limiter la fragilité de revenu.

Chacun de ces éléments a un effet particulier, mais tous diminuent la vitesse de diffusion du carbone. Lors du refroidissement à partir de l'austénite, le temps pour former la cémentite est plus long. Par là, le délai pour provoquer la transformation martensitique est allongé. Le refroidissement a besoin d'être moins drastique : trempé eau → huile → air soufflé → air calme. A mesure que le refroidissement est moins énergétique, le risque de tapure diminue. A fluide de trempé constant, les éléments de trempé procurent une trempabilité plus importante : les couches profondes du métal ont le temps d'atteindre  $M_s$  avant que la transformation perlitique ne démarre.

**Effet du Chrome.** Il forme avec le carbone, des carbures mixtes  $(Cr,Fe)_3C$ , plus durs que la cémentite. Il est  $\alpha$ -gène : il stabilise la ferrite. Le chrome est l'élément d'addition de base des aciers alliés.

**Effet du Nickel.** Il est  $\gamma$ -gène, c'est-à-dire qu'il stabilise la phase  $\gamma$ . Il ne donne pas de carbures, mais augmente la résilience, spécialement à basse température.

**Effet du Molybdène.** Il est surtout utilisé pour son aptitude à retarder l'apparition de la fragilité de revenu.

**Effet du Vanadium.** Il est  $\alpha$ -gène et carburigène. Les carbures de V sont particulièrement stables, ce qui améliore la résistance à chaud.

**Exemples d'aciers alliés.** Il s'agit d'exemples pris dans la gamme AUBERT & DUVAL.

- **819 B** - 36 NiCrMo 16 (élaboré à l'air),
- **819 A.W** - 35 NiCrMo 16 (refondu),
- **F.D.M.A** - 30 NiCrMo 16 (élaboré à l'air),
- **F.D.M.A.W** - 30 NiCrMo 16 (refondu),
- **MARVAL 18** - X 2 NiCoMo 18-9-5.

Pour ce dernier acier, il s'agit d'un type « Maraging ». Le principe de durcissement est différent. Cet acier possède une teneur en carbone très réduite et présente donc par trempe, une structure martensitique peu dure. Des éléments d'addition (Mo, Ti, Co) provoquent au revenu, une très fine précipitation, qui bloque la structure et la durcit. Les niveaux de résistance obtenus sont très élevés : typiquement  $R_m \sim 1900 \text{ N/mm}^2$ .

## 2 – 3. Les aciers inoxydables

**Présentation.** De petits ajouts de chrome (dès 1 à 2 %) diminuent la tendance à l'enrouillement des aciers.

A partir de 11%, le caractère inoxydable apparaît nettement.

Il est dû à la formation d'une couche « passive », épaisse de quelques Angström. Elle est initialement composée d'oxygène adsorbé, qui évolue en fonction du milieu au contact avec l'acier, vers des composés de type oxydes ou hydroxydes de chrome. Cette couche est chimiquement résistante, adhérente et imperméable. Elle protège donc le métal sous-jacent. Des additions de nickel et molybdène augmentent encore la résistance à la corrosion. En fonction de leur caractère  $\alpha$ -gène ou  $\gamma$ -gène, ces éléments vont avoir une influence sur la structure de l'acier.

Le diagramme de Schaeffler, Figure 3, permet une prévision de structure en fonction de la composition.

**Martensitiques.** Il s'agit d'une gamme, qui a pour base, un acier à 13 % chrome et 0,30 % de carbone. Malgré le caractère  $\alpha$ -gène du chrome, la transformation  $\alpha \rightarrow \gamma$  existe toujours, ce qui permet la transformation martensitique par trempe.

Ces aciers présentent une résistance à la corrosion certaine, avec des caractéristiques mécaniques proches des aciers alliés.

Un exemple de ce type d'acier est l'**X 13** - X30 Cr13, qui peut être utilisé en milieu faiblement corrosif.

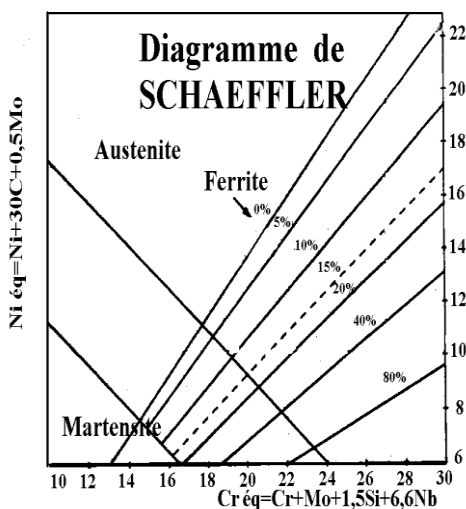


Figure 3 – Diagramme de Schaeffler.

D'autres nuances ont été mises au point, par :

- Addition de nickel et de molybdène, qui accroissent la résistance à la corrosion. L'effet  $\gamma$ -gène du nickel est compensé par l'augmentation de la teneur en chrome,
- Diminution de la teneur en carbone. Le carbone tend à la formation de carbures  $Cr_{23}C_6$ , qui appauvrissent la matrice en chrome et font alors perdre le caractère inoxydable.

Ce qui a donné les nuances suivantes :

- **A.P.X** - X 17 CrNi 16-2,
- **A.P.X 4** - X 6 CrNiMo 16-5-1,

qui conservent une structure martensitique et donc des caractéristiques mécaniques assez élevées. Des nuances à durcissement au revenu, par précipitation de particules, dans une matrice bas carbone, de type Maraging existent également :

- **X 17 U 4** - X 5 CrNiCuNb 16-4,
- **X 15 U 5 W** - X 5 CrNiCu 15-5,
- **MARVAL X 12** - X 1 CrNiMoAlTi 12-9-2.

**Austénitiques.** Sur la base d'un acier à 18 % chrome, l'addition de 8-10 % de nickel permet de renforcer la résistance à la corrosion, de manière très importante. Elle peut être encore améliorée, par l'addition de 2-3 % de molybdène. La nuance la plus courante est l'**X18MBC** – X2CrNiMo 17-12-3 ou 316L. La structure de ces aciers est austénitique, du fait de la teneur en nickel. Ceci implique de très faibles caractéristiques mécaniques ( $R_{p0,2} = 200 \text{ N/mm}^2$ ). Ces nuances ne sont utilisées dans les hautes pressions que sous la forme de placages protecteurs.

## 2 – 4. Les superalliages

Ce sont des alliages dont le métal de base est généralement le nickel, quelquefois le cobalt. Ils comportent systématiquement du chrome, qui permet la résistance à la corrosion ou à l'oxydation. Leur structure est cubique à faces centrées, donc de type austénitique, ce qui implique des résistances mécaniques faibles. Ces nuances peuvent être durcies par précipitation au revenu (vieillessement), de phases bases Titane ou Niobium. Il est possible de distinguer deux types de superalliages, selon leur usage :

Résistance à chaud : **PYRAD53NW** – IN718,

Résistance à la corrosion : **PER625** – IN625.

## 3 – Commentaires : la directive européenne appareils à pression.

Selon les termes de cette directive, les enceintes sous pression doivent être réalisées en nuances choisies parmi celles figurant dans les normes européennes harmonisées spécialisées. Ces normes décrivent des aciers doux, très ductiles, soudables, aptes à la réalisation des appareils à pression industriels, de grandes dimensions, travaillant sous quelques dizaines de bars au maximum et devant présenter avant tout un haut niveau de

sécurité, pour une utilisation sur de très longues durées. Ces aciers, ne sont généralement pas adaptés à la réalisation d'appareils de laboratoire, devant travailler sous des pressions élevées, mais de volume réduit et utilisés par un personnel restreint et très averti des dangers potentiels.

La directive a néanmoins prévu l'utilisation de matériaux ne figurant pas dans les normes précédentes, sous réserve de la présentation aux autorités européennes d'une demande de dérogation. Cette demande doit être conduite par un centre technique national. Pour la France, c'est le CETIM. En cas de succès, l'acier est homologué pour un seul appareil ou pour une série d'appareils rigoureusement identiques.