

المعهد العالي للدراسات التكنولوجية برادس
Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Radès.

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

WISSEM TAKTAK

COURS CHARPENTE METALLIQUE

Niveau : 3

Edition 2005

AVANT PROPOS

Ce fascicule de cours (version II), traite des méthodes de calcul des constructions métalliques. C'est une contribution qui s'ajoute à l'ensemble des ouvrages qui traitent des méthodes modernes selon l'EUROCODE 3 de calcul des structures en acier.

Destiné aux étudiants de 3^{ème} niveau, en génie civil, des instituts supérieurs des études technologiques et respectant le programme édifié par la commission d'élaboration des programmes nationaux, ce travail constitue un support d'initiation et de familiarisation avec le vocabulaire et les techniques de calcul dans cette discipline.

La première partie de ce cours est consacrée aux généralités sur le matériau acier, les procédés d'obtention des produits sidérurgiques, le vocabulaire de la construction métallique.

La deuxième partie présente les méthodes de calcul des actions climatiques (vent et neige), le choix de présenter la méthode simplifiée pour le calcul de l'action du vent sur les constructions courantes à base rectangulaire a pour objectif la présentation d'une démarche de calcul simple à comprendre et qui est à la base de la méthode générale.

La troisième partie est consacrée aux développements des organigrammes de dimensionnement des éléments fléchis et à la vérification de la stabilité au flambement des éléments comprimés.

Dans la quatrième partie il est question de moyen d'assemblage (boulons et soudures). Enfin une cinquième partie est consacré à la protection et à l'entretien.

On achève ce document par deux annexes, dans le premier on a résumé les formules de calcul et dans le deuxième on a recueilli la traduction en anglais et en arabe des principaux termes techniques rencontrés dans ce support.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à l'administration de l'iset de Rades, à l'ensemble du département de génie civil, aux collègues qui, avec leurs conseils et suggestions, contribuent à l'amélioration du contenu de ce cours.

Wissem TAKIAK

Tunis, juin, 2005

AMELIORATIONS APPORTEES VERSION II

Des améliorations de formes ont été apportées à la version précédente de ce fascicule, ces améliorations ont été suggérées en partie par le jury du concours de recrutement des technologues (juin 2004), ces recommandations sont les suivantes :

- Ajouter un avant propos à ce support ;
- Ajouter les dates d'éditons des ouvrages consultés (référencés en bibliographie) ;
- Corriger le double emploi de certains symboles.

En plus de ces améliorations, nous avons estimé intéressant de rajouter deux annexes, dans le premier nous avons résumé les principales formules rencontrées dans ce cours et dans le deuxième nous avons regroupé la traduction en anglais et en arabe de la terminologie propre à la construction métallique.

Wissem TAKTAK

Tunis, juin, 2005

Sommaire

CONTENU DU PROGRAMME	1
GENERALITES :	2
1 INTRODUCTION	2
1.1 Avantages de la construction métallique :	2
1.2 Inconvénients.....	2
2 LE MATERIAU ACIER	3
2.1 L'acier.....	3
2.2 Les procédés d'élaboration de l'acier.....	3
3 PRINCIPAUX PRODUITS UTILISES COMME ELEMENTS DE STRUCTURE.....	6
3.1 Produits laminés à chaud.....	6
3.2 Produits formés à froid	7
3.3 Produits dérivés des profils laminés et profils reconstitués soudés	8
4 CARACTERISTIQUES DES PROFILES.....	9
5 ESSAIS MECANQUES :	11
5.1 Essai de traction :	11
5.2 Essai de flexion par choc (essai de résilience) :	12
5.3 Essais de dureté :	12
5.4 Essai de pliage :	12
6 DESIGNATION SYMBOLIQUE DES ACIERS :	13
7 PROPRIETES DES ACIERS LAMINES:	14
8 CRITERES DE CHOIX DES ACIERS EN CONSTRUCTION METALLIQUE:	15
8.1 Choix de la nuance :	15
8.2 Choix de la qualité :	15
TERMINIOLOGIE :	16
1 BATIMENT EN PROFILS À AME PLEINE :	16
2 STRUCTURE À TOITURE EN TREILLIS :	16
3 DEFINITIONS	17
GENERALITES SUR LES CHARGES ET SURCHARGES REGLEMENTAIRES :	19
1 ETATS LIMITES	19
2 ACTIONS :	19
3 DISPOSITIONS DES CHARGES ET CAS DE CHARGES	20
4 COMBINAISONS D'ACTIONS :	20
4.1 Combinaisons d'actions aux E.L.U :	20
4.2 Combinaisons d'actions aux E.L.S :	20
5 CHEMINEMENT DES CHARGES VERTICALES :	21
6 CHEMINEMENT DES CHARGES HORIZONTALES :	22
6.1 Vent sur longpan :	22
6.2 Vent sur pignon :	22

ACTIONS DU VENT SUR LES CONSTRUCTIONS COURANTES A BASE RECTANGULAIRE (METHODE SIMPLIFIEE).....	23
1 CARACTERISTIQUES	23
2 PRESSIONS DYNAMIQUES	24
3 ACTION RESULTANTE SUR UNE PAROI :	25
4 ACTIONS EXTERIEURES	26
4.1 Parois verticales.....	26
4.2 Toiture.....	26
5 ACTIONS INTERIEURES	27
6 ACTIONS LOCALES :	27
7 ACTIONS D'ENSEMBLE :	28
ACTIONS DE LA NEIGE SUR LES CONSTRUCTIONS	29
1 INTRODUCTION	29
2 CHARGE DE NEIGE SUR LE SOL.....	29
3 CHARGE DE NEIGE SUR LES TOITURES OU AUTRES SURFACES	29
3.1 Facteurs influençant les valeurs de μ :	30
3.2 Cas de charge :	31
ETUDE DES ELEMENTS FLECHIS.....	34
1 CHOIX ENTRE ANALYSE PLASTIQUE ET ANALYSE ELASTIQUE	34
2 CLASSIFICATION DES SECTIONS TRANSVERSALES	35
3 FLEXION SIMPLE (M) :	37
4 FLEXION SIMPLE ET EFFORT TRANCHANT (M + V) :	37
5 FLEXION COMPOSEE SEULE (M + N) :	38
6 MOMENT DE FLEXION, EFFORT TRANCHANT ET EFFORT AXIAL (M + V + N).....	38
7 FLEXION DEVIEE :	39
7.1 Calcul en élasticité (sections de classe 3)	39
7.2 Calcul en plasticité (sections de classes 1 et 2)	39
LES PHENOMENES D'INSTABILITE ELASTIQUE.....	41
1 INTRODUCTION	41
2 FLAMBEMENT.....	42
2.1 Flambement simple	43
2.2 Flambement flexion (sans risque de déversement).....	45
LES ASSEMBLAGES EN CONSTRUCTION METALLIQUE.....	47
1 INTRODUCTION	47
2 FONCTIONNEMENT DES ASSEMBLAGES	48
2.1 Fonctionnement par obstacle	48
2.2 Fonctionnement par adhérence des pièces assemblées.....	48
2.3 Fonctionnement mixte	48

3	LES ASSEMBLAGES BOULONNES	48
3.1	<i>Composition :</i>	48
3.2	<i>Dimensionnement des boulons ordinaires :</i>	50
3.3	<i>Dimensionnement des boulons précontraints :</i>	52
4	PRECAUTIONS CONSTRUCTIVES	54
	LES ASSEMBLAGES SOUDES	56
1	INTRODUCTION	56
2	PROCEDES DE SOUDAGE.....	57
2.1	<i>Procédé chimique au chalumeau oxyacétylénique</i>	57
2.2	<i>Procédés à l'arc électrique</i>	57
3	DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES	59
3.1	<i>Définitions de la gorge des cordons d'angle</i>	59
3.2	<i>Soudures bout à bout</i>	59
3.3	<i>Soudures d'angle</i>	59
3.4	<i>Autres types de liaisons soudées</i>	60
4	PRECAUTIONS CONSTRUCTIVES	60
5	CALCUL DES CORDONS DE SOUDURE.....	62
5.1	<i>Pré dimensionnement de la gorge</i>	62
5.2	<i>Cordons frontaux</i>	62
5.3	<i>Cordons latéraux</i>	63
5.4	<i>Cordons obliques</i>	63
	PROTECTION ET ENTRETIEN	64
1	INTRODUCTION	64
2	PREPARATION DE LA SURFACE DE L'ACIER	64
2.1	<i>Propreté de surface</i>	65
2.2	<i>Rugosité de surface</i>	65
2.3	<i>Procédés de préparation de surface :</i>	66
3	REVETEMENT DES STRUCTURES PAR PEINTURE	69
3.1	<i>Choix du type de peinture</i>	69
3.2	<i>Système de peinture</i>	71
3.3	<i>Modes d'application des peintures</i>	72
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	74
	ANNEXE I	
	ANNEXE II	

CONTENU DU PROGRAMME

- ✚ Constitution des structures métalliques
- ✚ Charges et surcharges réglementaires
- ✚ Calcul et réalisation des éléments fléchis (flexion simple et composée)
- ✚ Conception et calcul d'un ouvrage en construction métallique.
 - Les assemblages boulonnés : calcul et réalisation
 - Les assemblages soudés : calcul et réalisation
- ✚ Protection et entretien

GENERALITES :

1 INTRODUCTION

Jusqu'à 1993, la conception et le calcul des constructions métalliques étaient régis par différentes réglementations :

- Les règles de calcul des constructions en acier, dites règles CM 66.
- Le titre V du fascicule 61 du cahier des prescriptions communes.
- Les normes NF.
- L'additif 80

Depuis 1993, une nouvelle réglementation européenne est entrée en vigueur et impose, en remplacement de ces divers et précédents textes, un code unique : l'Eurocode 3.

1.1 Avantages de la construction métallique :

- ❖ Résistance mécanique : -résistance élevée à la traction permettant des portées et hauteurs importantes ;
-possibilité d'adaptation plastique pour une plus grande sécurité ;
- ❖ Industrialisation totale : préfabrication d'un bâtiment en atelier et montage sur chantier ;
- ❖ Transport aisé grâce au poids peu élevé ;
- ❖ Possibilité de modification et de recyclage d'un bâtiment.

1.2 Inconvénients

- Prix élevé (concurrentiel avec le béton armé pour les grandes portées) ;
- Mauvaise tenue au feu ce qui implique des mesures de protection onéreuses ;
- Entretien régulier du à la corrosion du métal.

2 LE MATERIAU ACIER

2.1 L'acier

L'acier est essentiellement une combinaison de fer et de carbone. On ne le retrouve pas à l'état naturel ; il résulte d'une transformation de matière première tirée du sol. Les conditions matérielles de cette transformation entraînent dans sa composition la présence, en très faibles proportions, d'autres éléments (phosphore, soufre) considérés comme impuretés. Suivant la qualité de l'acier que l'on veut obtenir, il est possible d'abaisser le pourcentage de ces impuretés au cours de l'élaboration.

Mais l'acier peut également contenir d'autres éléments (silicium, manganèse, chrome, nickel, tungstène...) introduits volontairement en vue de modifier sa composition chimique et par suite ses caractéristiques physiques et mécaniques.

Les éléments additionnés permettent d'obtenir des qualités différentes classées sous forme de « nuance ».

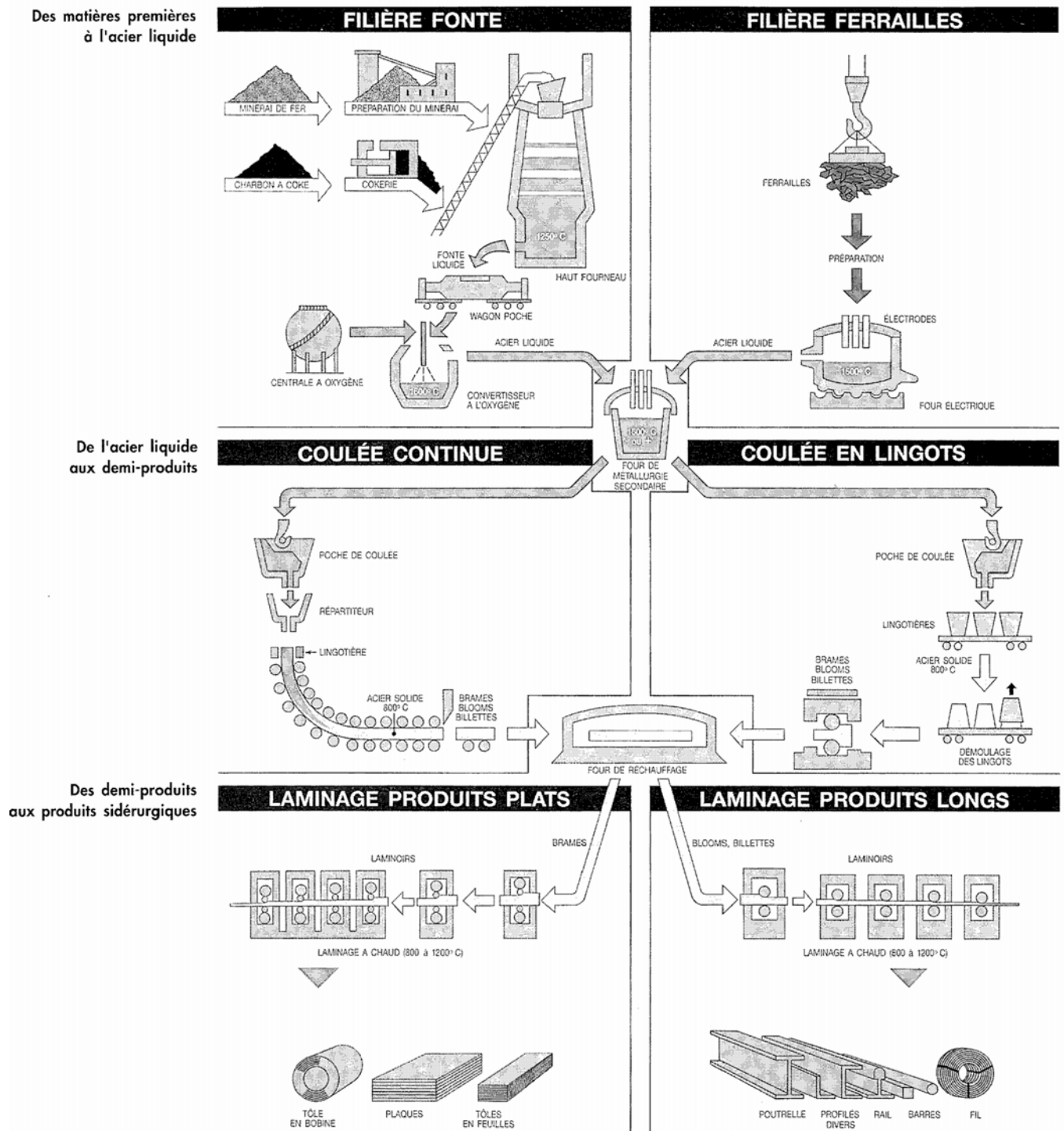
2.2 Les procédés d'élaboration de l'acier

2.2.1 Des matières premières à l'acier liquide:

Les matières essentielles entrant dans la composition de l'acier sont les minerais de fer, le coke et la ferraille.

2.2.2 De l'acier liquide au demi-produits:

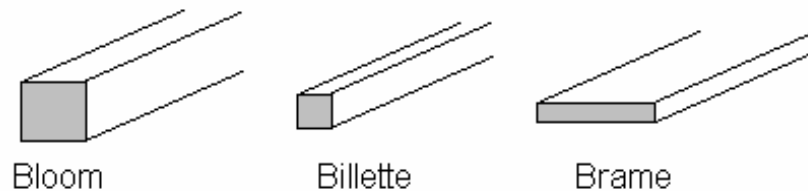
A la fin de l'opération d'élaboration de l'acier, par quelque procédé que ce soit, les scories sont déversées dans une cuve et l'acier est recueilli à l'état liquide dans une poche garnie de réfractaire. A partir de ce stade, la mise en forme en vue du laminage final peut se faire suivant deux schémas différents : la coulée continue et la coulée en lingots.



Les procédés d'élaboration de l'acier

Figure 1-1

Pour les formes carrées, ces produits prennent les noms de bloom ou billette suivant que la dimension est plus grande ou plus petite que 120 mm ; le nom de brame pour les formes rectangulaires d'épaisseur supérieure à 50 mm



Les demi-produits (Bloom, Billette et Brame)

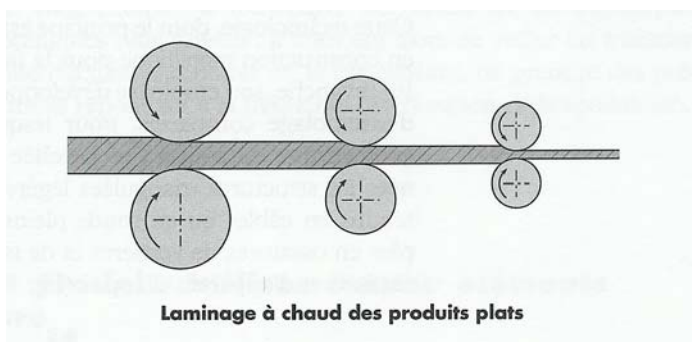
Figure 1-2

2.2.3 Des demi-produits aux produits sidérurgiques :

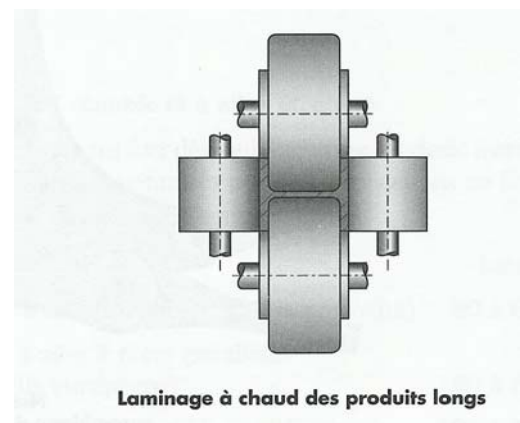
Les formes des produits sidérurgiques finis laminés à chaud sont classées suivant deux familles :

- les produits plats : plaque (épaisse), tôle (mince), feuille ou bobine ;
- les produit longs, comprennent les profils de petites sections : rond, carré, rectangle, trapèze, T, L, U, tube (sans soudure) ; les profils lourds : poutrelle (I,H), palplanche, rail, fil machine..

Leurs dimensions et caractéristiques sont normalisées et répertoriées sur catalogues.



Laminage à chaud des produits plats



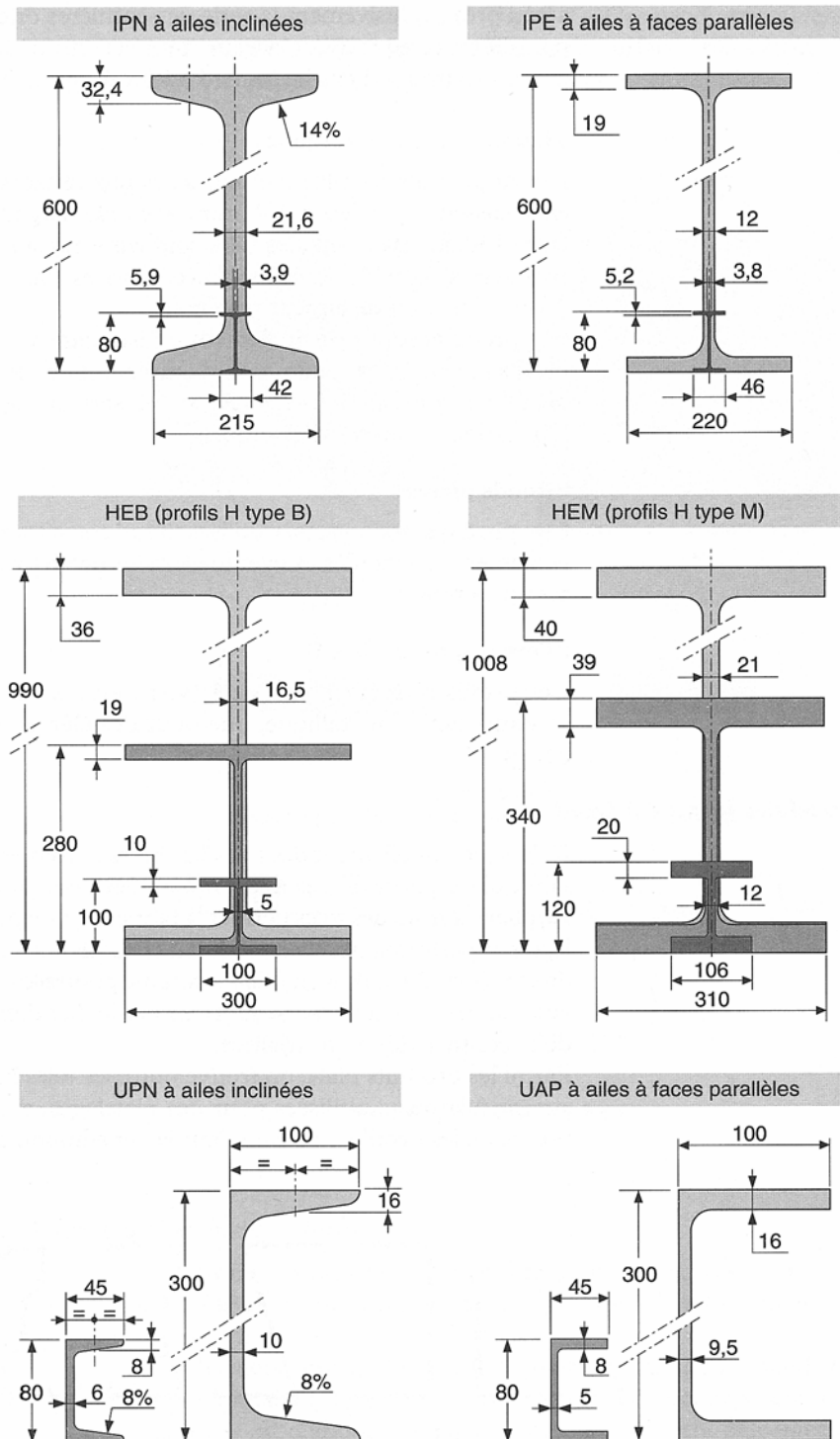
Laminage à chaud des produits longs

Le laminage à chaud

Figure 1-3

3 PRINCIPAUX PRODUITS UTILISES COMME ELEMENTS DE STRUCTURE

3.1 Produits laminés à chaud



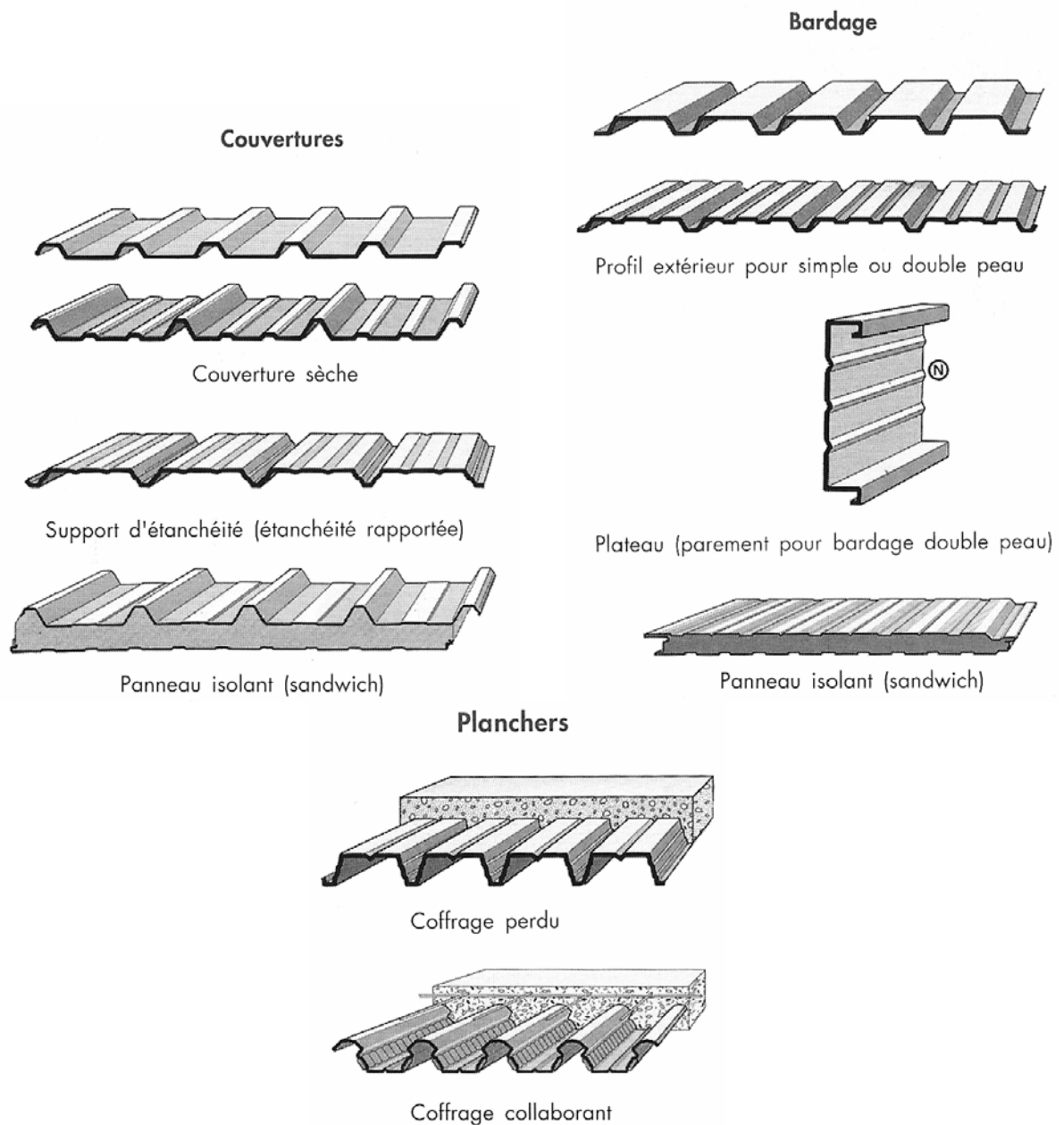
Gamme de profils laminés courants

Figure 1-4

3.2 Produits formés à froid

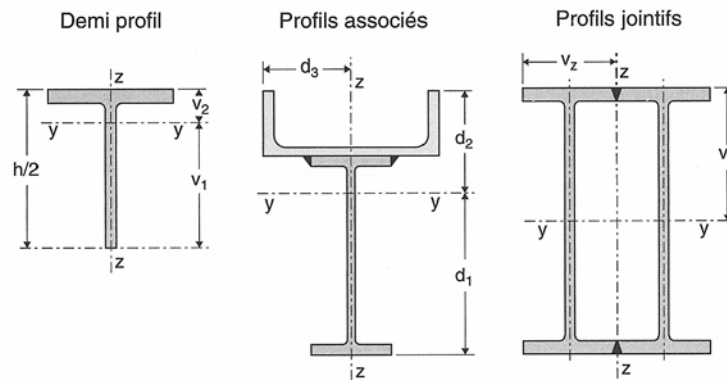


*Produits longs formés à froid
Exemples de sections transversales
Figure 1-5*



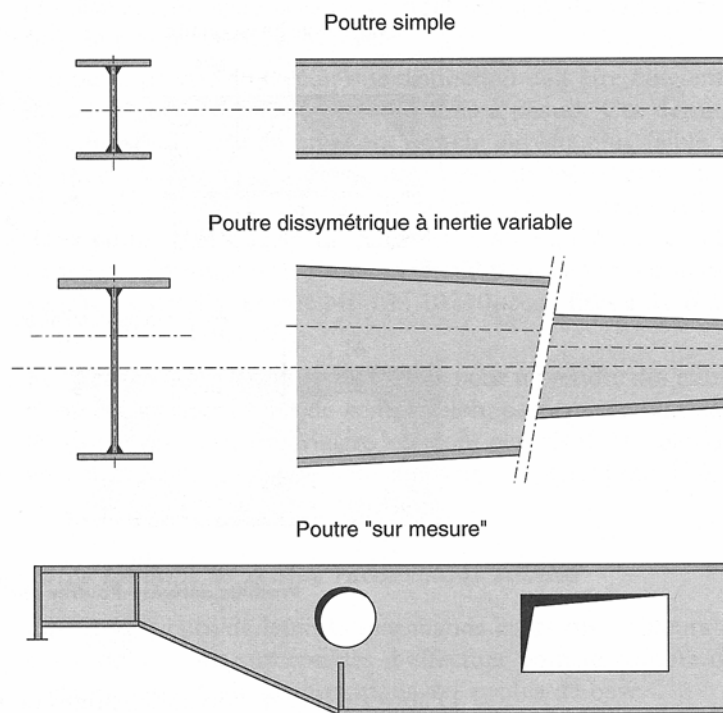
*Produits plats formés à froid
Figure 1-6*

3.3 Produits dérivés des profils laminés et profils reconstitués soudés



Produits dérivés

Figure 1-7

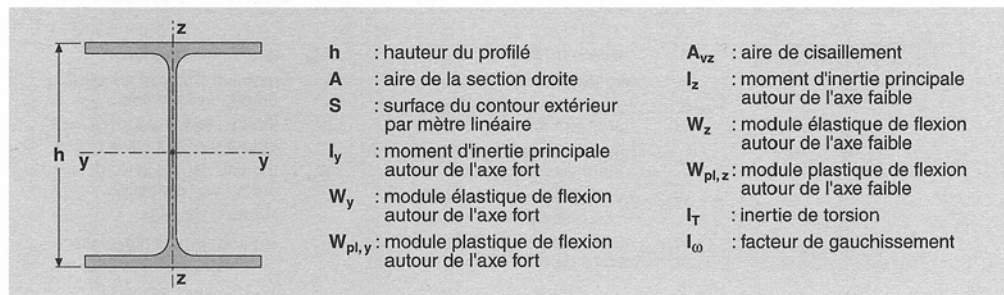


Profils reconstitués soudés

Figure 1-8

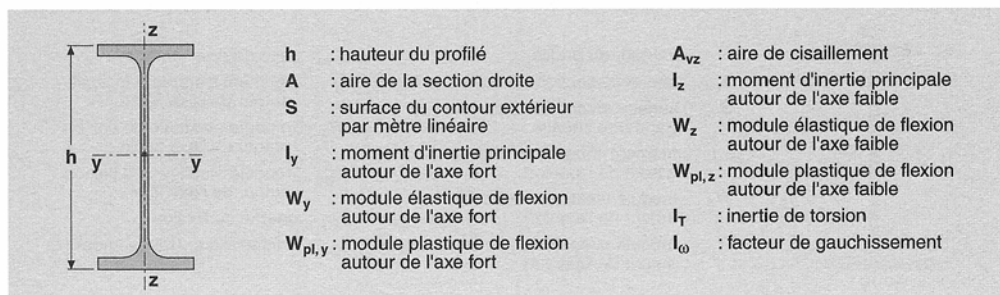
4 CARACTERISTIQUES DES PROFILES

Caractéristiques des profilés HEA												
PROFIL	h mm	A cm ²	S m ² /m	I _y cm ⁴	W _y cm ³	W _{pl,y} cm ³	A _{vz} cm ²	I _z cm ⁴	W _z cm ³	W _{pl,z} cm ³	I _T cm ⁴	I _w × 10 ⁻³ cm ⁶
HEA 100	96	21,24	0,561	349,2	72,76	83,01	7,56	133,8	26,76	41,14	5,24	2,58
HEA 120	114	25,34	0,677	606,2	106,3	119,5	8,46	230,9	38,48	58,85	5,99	6,47
HEA 140	133	31,42	0,794	1 033	155,4	173,5	10,12	389,3	55,62	84,85	8,13	15,06
HEA 160	152	38,77	0,906	1 673	220,1	245,1	13,21	615,6	76,95	117,6	12,19	31,41
HEA 180	171	45,25	1,024	2 510	293,6	324,9	14,47	924,6	102,7	156,5	14,8	60,21
HEA 200	190	53,83	1,136	3 692	388,6	429,5	18,08	1 336	133,6	203,8	20,98	108
HEA 220	210	64,34	1,255	5 410	515,2	568,5	20,67	1955	177,7	270,6	28,46	193,3
HEA 240	230	76,84	1,369	7 763	675,1	744,6	25,18	2769	230,7	351,7	41,55	328,5
HEA 260	250	86,82	1,484	10 450	836,4	919,8	28,76	3 668	282,1	430,2	52,37	516,4
HEA 280	270	97,26	1,603	13 670	1 013	1 112	31,74	4 763	340,2	518,1	62,1	785,4
HEA 300	290	112,5	1,717	18 260	1 260	1 383	37,28	6 310	420,6	641,2	85,17	1 200
HEA 320	310	124,4	1,756	22 930	1 479	1 628	41,13	6 985	465,7	709,7	108	1 512
HEA 340	330	133,5	1,795	27 690	1 678	1 850	44,95	7 436	495,7	755,9	127,2	1 824
HEA 360	350	142,8	1,834	33 090	1 891	2 088	48,96	7 887	525,8	802,3	148,8	2 177
HEA 400	390	159	1,912	45 070	2 311	2 562	57,33	8 564	570,9	872,9	189	2 942
HEA 450	440	178	2,011	63 720	2 896	3 216	65,78	9 465	631	965,5	243,8	4 148
HEA 500	490	197,5	2,11	86 970	3 550	3 949	74,72	10 370	691,1	1 059	309,3	5 643
HEA 550	540	211,8	2,209	111 900	4 146	4 622	83,72	10 820	721,3	1 107	351,5	7 189
HEA 600	590	226,5	2,308	141 200	4 787	5 350	93,21	11 270	751,4	1 156	397,8	8 978
HEA 650	640	241,6	2,407	175 200	5 474	6 136	103,2	11 720	781,6	1 205	448,3	11 030
HEA 700	690	260,5	2,505	215 300	6 241	7 032	117	12 180	811,9	1 257	513,9	13 350
HEA 800	790	285,8	2,698	303 400	7 682	8 699	138,8	12 640	842,6	1 312	596,9	18 290
HEA 900	890	320,5	2,896	422 100	9 485	10 810	163,3	13 550	903,2	1 414	736,8	24 960
HEA 1000	990	346,8	3,095	553 800	11 190	12 820	184,6	14 000	933,6	1 470	822,4	32 070



Caractéristiques des profils H européens HEA
Tableau 1-1

Caractéristiques des profils I européens												
PROFIL	h mm	A cm ²	S m ² /m	I _y cm ⁴	W _y cm ³	W _{pl,y} cm ³	A _{vz} cm ²	I _z cm ⁴	W _z cm ³	W _{pl,z} cm ³	I _y cm ⁴	I _u × 10 ⁻³ cm ⁶
IPE 80	80	7,64	0,328	80,14	20,03	23,22	3,58	8,49	3,69	5,82	0,70	0,12
IPE 100	100	10,32	0,400	171	34,20	39,41	5,08	15,92	5,79	9,15	1,20	0,35
IPE 120	120	13,21	0,475	317,8	52,96	60,73	6,31	27,67	8,65	13,58	1,74	0,89
IPE 140	140	16,43	0,551	541,2	77,32	88,34	7,64	44,92	12,31	19,25	2,45	1,98
IPE 160	160	20,09	0,623	869,3	108,7	123,9	9,66	68,31	16,66	26,10	3,60	3,96
IPE 180	180	23,95	0,698	1 317	146,3	166,4	11,25	100,9	22,16	34,60	4,79	7,43
IPE 200	200	28,48	0,768	1 943	194,3	220,6	14,00	142,4	28,47	44,61	6,98	12,99
IPE 220	220	33,37	0,848	2 772	252,0	285,4	15,88	204,9	37,25	58,11	9,07	22,67
IPE 240	240	39,12	0,922	3 892	324,3	366,6	19,14	283,6	47,27	73,92	12,88	37,39
IPE 270	270	45,94	1,041	5 790	428,9	484,0	22,14	419,9	62,20	96,95	15,94	70,58
IPE 300	300	53,81	1,160	8 356	557,1	628,4	25,68	603,8	80,50	125,2	20,12	125,9
IPE 330	330	62,61	1,254	11 770	713,1	804,3	30,81	788,1	98,52	153,7	28,15	199,1
IPE 360	360	72,73	1,353	16 270	903,6	1 019	35,14	1 043	122,8	191,1	37,32	313,6
IPE 400	400	84,46	1,467	23 130	1 156	1 307	42,69	1 318	146,4	229,0	51,08	490
IPE 450	450	98,82	1,605	33 740	1 500	1 702	50,85	1 676	176,4	276,4	66,87	791
IPE 500	500	115,5	1,744	48 200	1 928	2 194	59,87	2 142	214,2	335,9	89,29	1 249
IPE 550	550	134,4	1,877	67 120	2 441	2 787	72,34	2 668	254,1	400,5	123,2	1 884
IPE 600	600	156,0	2,015	92 080	3 069	3 512	83,78	3 387	307,9	485,6	165,4	2 846
IPE 750 × 137	753	174,6	2,506	159 900	4 246	4 865	92,90	5 166	392,8	614,1	137,1	6 980
IPE 750 × 147	753	187,5	2,510	166 100	4 411	5 110	105,4	5 289	399,2	630,8	161,5	7 141
IPE 750 × 173	762	221,3	2,534	205 800	5 402	6 218	116,4	6 873	514,9	809,9	273,6	9 391
IPE 750 × 196	770	250,8	2,552	240 300	6 241	7 174	127,3	8 175	610,1	958,8	408,9	11 290



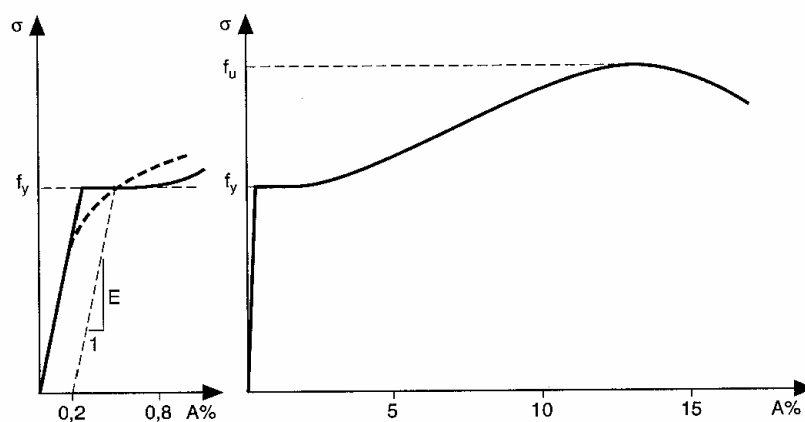
Caractéristiques des profils I européens IPE
Tableau 1-2

5 ESSAIS MECANQUES :

5.1 Essai de traction :

Il s'agit de l'essai fondamental qui fournit les grandeurs caractéristiques directement exploitables dans les calculs de dimensionnement.

- La limite d'élasticité f_y à partir de laquelle les allongements $A\%$ deviennent permanents (déformation irréversible).
- La contrainte de rupture à la traction f_u .
- Le module d'élasticité longitudinale de l'acier $E = 210\,000\text{ MPa}$
- Le module d'élasticité transversale de l'acier $G \approx 81\,000\text{ MPa}$
- Le coefficient de poisson $\nu = 0.3$
- Le coefficient de dilatation $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} [/ ^\circ\text{C}]$

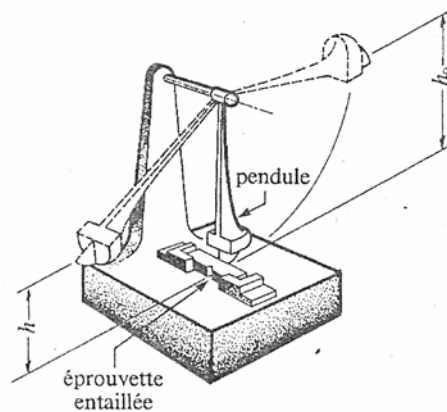


*Diagrammes types d'allongement des aciers
de construction métallique
Figure 1-9*

5.2 Essai de flexion par choc (essai de résilience) :

Cet essai a pour objectif de mesurer l'énergie absorbée par une éprouvette bi-appuyée, comportant une entaille médiane en V, lors de sa rupture en flexion sous le choc d'un mouton-pendule. Cette énergie caractérise la ductilité de l'acier et sa sensibilité à la rupture fragile en fonction de la température.

$$\text{Energie de rupture} = m g (h_0 - h)$$



Principe de l'essai de flexion par choc
Figure 1-10

5.3 Essais de dureté :

Les essais de dureté consistent à mesurer la pénétration d'un outil conventionnel dans la pièce à tester sous une charge prédéterminée.

5.4 Essai de pliage :

Cet essai permet d'apprécier qualitativement la ductilité d'un acier et l'aptitude au formage à froid par pliage des tôles ou barres constituées de ce matériau.

6 DESIGNATION SYMBOLIQUE DES ACIERS :

NUANCE		QUALITE
SYMBOLES PRINCIPAUX		SYMBOLES ADDITIONNELS
Lettre	Caractéristiques mécaniques	
Exp : S	235	JR

Symboles principaux	Symbole	Désignation
	<i>G</i>	<i>Acier moulé</i>
	<i>S</i>	<i>Aciers de construction</i>
	<i>E</i>	<i>Aciers de construction mécanique</i>
	<i>B</i>	<i>Aciers à béton</i>
	<i>Y</i>	<i>Aciers pour béton précontraint</i>
<i>Ces symboles sont suivis de la valeur de la limite d'élasticité ou de la résistance minimale à la traction en MPa</i>		

Tableau 1-3

Symboles Additionnels pour l'acier	Energie de rupture (J)			Température d'essai (°C)
	27	40	50	
	<i>JR</i>	<i>KR</i>	<i>LR</i>	<i>20</i>
	<i>J0</i>	<i>K0</i>	<i>L0</i>	<i>0</i>
	<i>J2</i>	<i>K2</i>	<i>L2</i>	<i>-20</i>
	<i>J3</i>	<i>K3</i>	<i>L3</i>	<i>-30</i>
	<i>J4</i>	<i>K4</i>	<i>L4</i>	<i>-40</i>
	<i>J5</i>	<i>K5</i>	<i>L5</i>	<i>-50</i>
	<i>J6</i>	<i>K6</i>	<i>L6</i>	<i>-60</i>

Tableau 1-4

7 PROPRIETES DES ACIERS LAMINES:

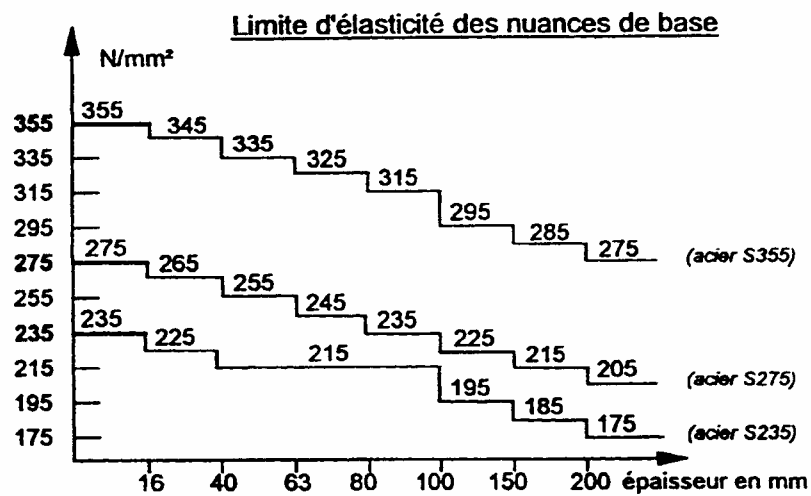


Figure 1-11

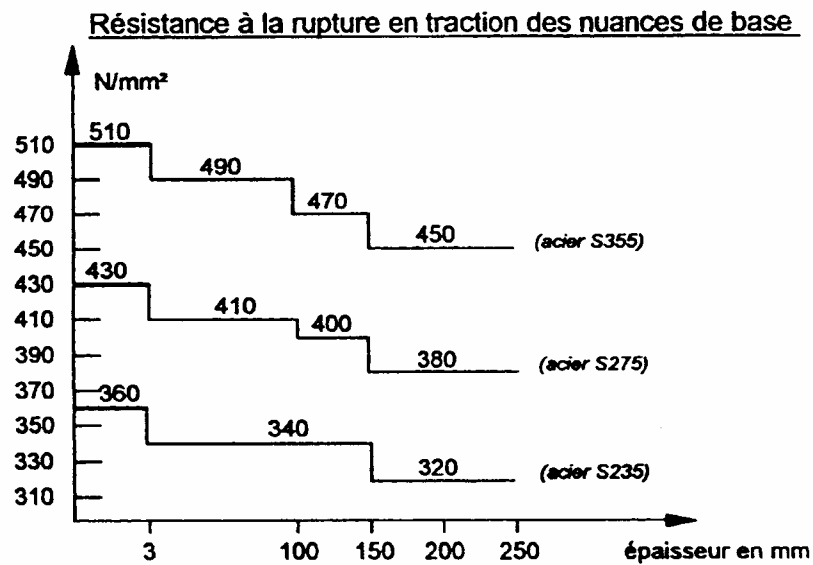


Figure 1-12

8 CRITERES DE CHOIX DES ACIERS EN CONSTRUCTION METALLIQUE:

8.1 Choix de la nuance :

Il s'agit essentiellement, à travers ce choix, de fixer le niveau de la limite d'élasticité, appelée à servir de référence dans la conduite des calculs de dimensionnement. Le plus souvent, on recherche le niveau le plus élevé possible puisque la réduction de poids qui en résulte permet :

- Une économie directe sur les coûts de matière,
- Une mise en œuvre plus aisée en atelier,
- Une amélioration des conditions de transport et de montage.

Il va de soi que des facteurs limitatifs importants interviennent dans l'augmentation des caractéristiques mécaniques. Très fréquemment, le respect des critères de déformation régit le dimensionnement des ossatures métalliques et non le niveau de contrainte. De plus, l'augmentation de flexibilité de la structure qui accompagne celle des contraintes conduit à aggraver les effets dynamiques éventuels, comme ceux dus au vent, et rend aussi plus pénalisants les critères de résistance des éléments soumis aux différents phénomènes d'instabilité

8.2 Choix de la qualité :

Pour une structure donnée, le choix d'une qualité d'acier doit faire intervenir différents paramètres :

- La température minimale de service de l'ouvrage,
- L'épaisseur maximale des pièces constitutives de la structure,
- La nuance d'acier prévue,
- Le niveau des contraintes de traction subies par la structure,
- La nature des sollicitations du point de vue de leur vitesse d'application,...

TERMINIOLOGIE :

1 BATIMENT EN PROFILS À AME PLEINE :

Caractéristiques du bâtiment à portée libre

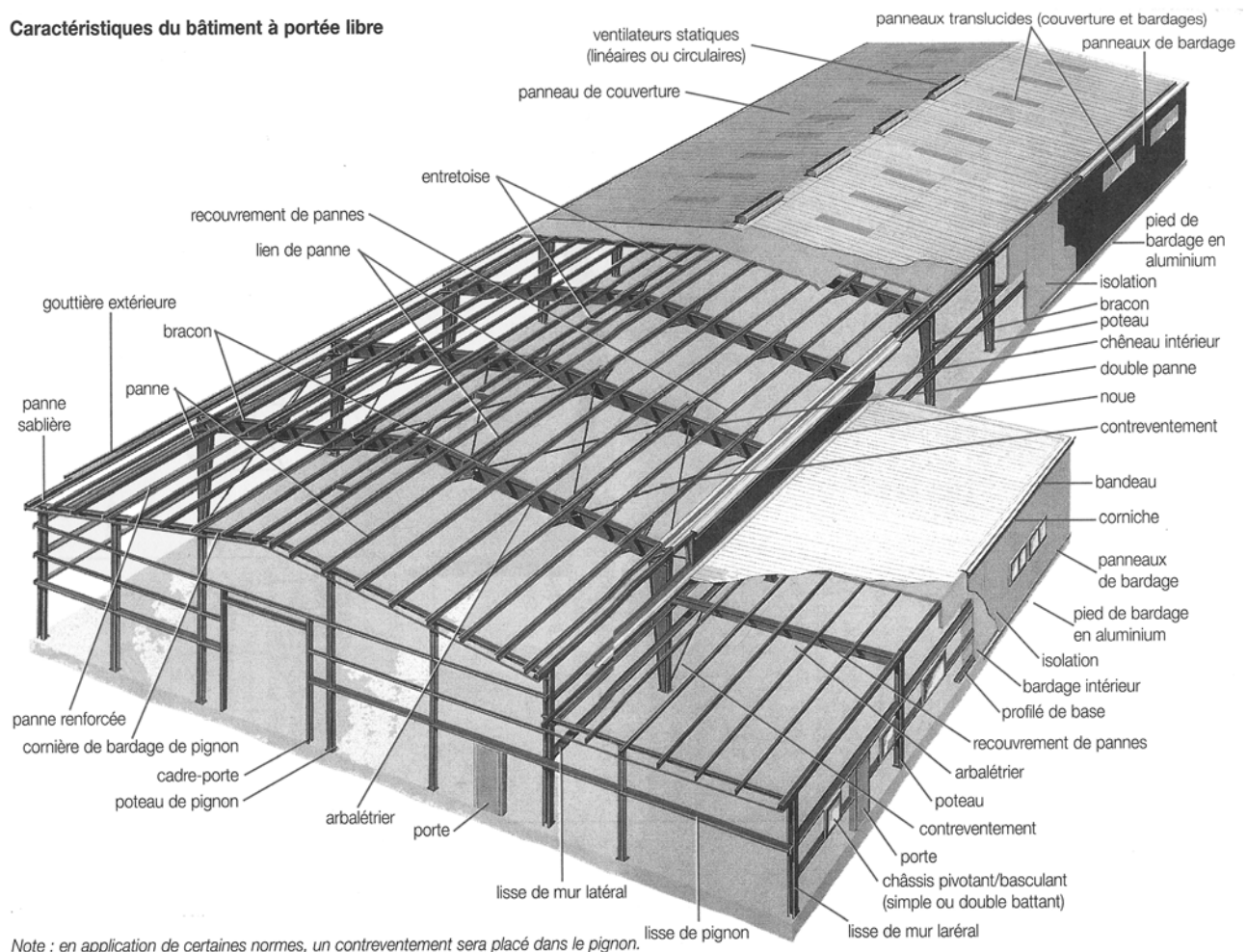


Figure 2-1

2 STRUCTURE À TOITURE EN TREILLIS :

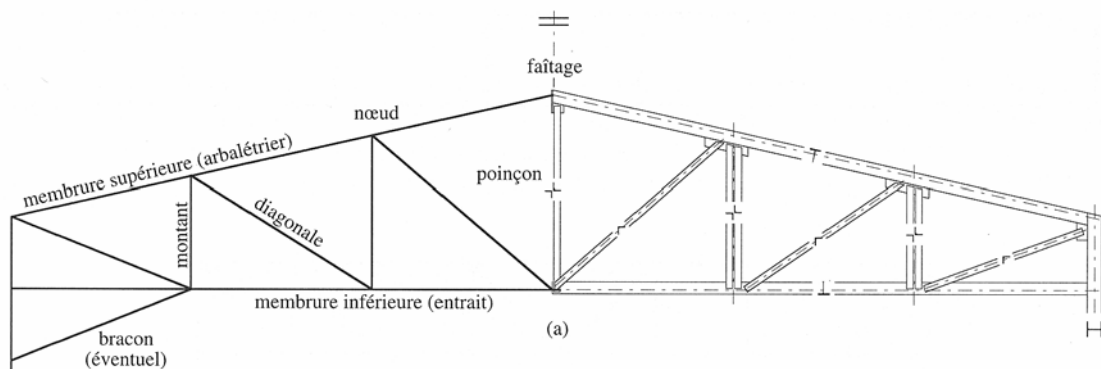


Figure 2-2

3 DEFINITIONS

Aiguille : Tige ou barre travaillant à la traction et supportant en son centre le tirant de certaines fermes.

Appenti : Toiture à une seule pente adossée à un mur ou à un bâtiment par son bord supérieur (faîtage) et dont le bord inférieur est soutenu par une sablière ou des poteaux.

Arbalétrier : Membrane supérieure de la poutre triangulée appelée ferme qui, dans un comble, supporte les pannes et les autres éléments de la toiture.

Arêtier : Pièce de charpente placée sous l'arête (intersection de 2 versants) et sur laquelle s'assemblent les autres éléments de la charpente.

Auvent : Partie de la toiture d'une halle débordant largement à l'extérieur de la ligne des poteaux supports.

Brisure : Changement de direction affectant une barre dans un système de construction quelconque.

Chéneau : Canal disposé en bas de pente des toitures et servant à recueillir les eaux de pluie et à les diriger vers les tuyaux de descente.

Comble : Partie supérieure (faîte) d'un bâtiment. Volume situé sous les versants de la toiture.

Croupe : Versant de toiture permettant de renvoyer les eaux sur les chéneaux ou les gouttières implantés sur toute la périphérie d'un bâtiment.

Contreventements : Dispositif assurant la stabilité d'un bâtiment, d'une ossature et s'opposant à la déformation, au déversement ou au renversement des constructions sous l'action de forces horizontales.

Diagonale : Barre placée en diagonale dans les panneaux d'une poutre en treillis ou d'une construction triangulée en général.

Echantignolle : Sorte d'équerre en fer plat plié servant à assujettir une panne sur un arbalétrier.

Empannons : Pièce destinée à diviser en plusieurs portées intermédiaires l'intervalle entre 2 fermes, de manière à réduire la section des pannes.

Entrait : Membrane inférieure d'une ferme dans un comble à deux ou plusieurs pentes.

Faîtage : Arête longitudinale formée au sommet d'une toiture par la rencontre des 2

versants.

Ferme : Poutre généralement triangulée, dont la membrure supérieure, à simple ou double inclinaison, règle la pente d'une toiture. Avec les pannes qu'elle supporte, la ferme constitue le principal de l'ossature des combles d'un édifice.

Gousset : Pièce de tôle plane, sur laquelle viennent s'assembler plusieurs barres convergentes.

Lattis : Pièce métallique, généralement en cornière, fixée sur les chevrons parallèlement au faîtage et supportant une rangée de tuiles.

Montant : Toute barre, entrant dans la composition d'une charpente métallique en treillis et joignant les membrures dans une direction perpendiculaire à l'une au moins de ces membrures.

Nœud : Point où concourent deux ou plusieurs barres d'une ossature en assemblage commun.

Panne : Poutre reliant les fermes dans un comble et reportant sur celles-ci les charge et surcharges transmises directement par les éléments de la couverture.

Poinçon : Montant central d'une ferme en treillis à 2 pentes.

Poteau : Élément vertical d'une ossature collectant les charges et surcharges des poutres qui s'y attachent et reportant sur l'infrastructure ou les fondations de la construction.

Sablière : Panne située à la partie basse d'un versant de toiture près du chéneau.

Solivage : Ensemble de solives composant l'ossature d'un plancher.

Toiture : Partie supérieure d'un bâtiment. Ensemble de tous les éléments qui ont pour fonction de supporter la couverture.

Versant : Plan incliné d'une toiture.

GENERALITES SUR LES CHARGES ET SURCHARGES REGLEMENTAIRES :

1 ETATS LIMITES

Les états limites sont des états au-delà desquels la structure ne satisfait plus aux exigences de performance pour lesquelles elle a été conçue.

Les états limites sont classés en :

- états limites ultimes,
- états limites de service.

Les états limites ultimes sont associés à la ruine par déformation excessive, rupture, ou perte de stabilité de la structure ou d'une de ses parties, y compris les appuis et les fondations.

Les états limites de service correspondent aux états au delà desquels les critères spécifiés d'exploitation ne sont plus satisfaits, on distingue :

- Les déformations ou flèches affectant l'aspect ou l'exploitation efficace de la construction (y compris le fonctionnement des machines ou des services) ou provoquant des dommages aux finitions ou aux éléments non structuraux.
- Les vibrations incommodant les occupants, endommageant le bâtiment ou son contenu, ou limitant son efficacité fonctionnelle.

2 ACTIONS :

Une action (F) est :

- une force (charge) appliquée à la structure (action directe), ou
- une déformation imposée (action indirecte). Exemple : effets thermiques ou déplacements d'appui.

Les actions sont classées : (en fonction de leur variation dans le temps) :

- actions permanentes (G), telles que poids propre des structures et équipements fixes.

- Actions variables (Q) : telles que charges d'exploitation, action du vent ou de la neige.
- Actions accidentelles (A), telles que explosions ou chocs de véhicules.

3 DISPOSITIONS DES CHARGES ET CAS DE CHARGES

- Une disposition des charges est déterminée en fixant la position, le niveau d'intensité et la direction d'une action libre.
- Un cas de charge est déterminé en fixant les dispositions compatibles des charges et l'ensemble des déformations et des imperfections à considérer pour une vérification donnée.

4 COMBINAISONS D'ACTIONS :

4.1 Combinaisons d'actions aux E.L.U :

- Situations de projet durables et transitoires (Combinaison fondamentale) :

$$p_{ELU} = \sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_j + \gamma_{Q1} \cdot Q_1 + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_i$$

- Situations de projet accidentelles :

$$p_{ELU} = \sum_j \gamma_{GA,j} \cdot G_j + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_1 + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_i$$

Pour les structures de bâtiment, dans un but de simplification, la combinaison fondamentale peut être remplacée par :

□ Combinaison simplifiée :

$$p_{ELU} = \max \left\{ \begin{array}{l} \sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_j + \gamma_{Q1} \cdot Q_1 \\ \sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_j + 0.9 \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot Q_i \end{array} \right.$$

4.2 Combinaisons d'actions aux E.L.S :

- Combinaisons rares : $p_{ELS} = \sum_j G_j + Q_1 + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_i$
- Combinaisons fréquentes : $p_{ELS} = \sum_j G_j + \psi_{1,1} \cdot Q_1 + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_i$
- Combinaisons quasi-permanentes : $p_{ELS} = \sum_j G_j + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_i$

Pour les structures de bâtiment, dans un but de simplification, les expressions pour les combinaisons rare et fréquente peuvent être remplacée par :

□ Combinaison simplifiée :
$$p_{ELS} = \max \left\{ \begin{array}{l} \sum_j G_j + Q_1 \\ \sum_j G_j + 0.9 \sum_{i \geq 1} Q_i \end{array} \right.$$

Coefficients partiels de sécurité γ :

	ACTIONS PERMANENTES	ACTIONS VARIABLES
Effet défavorable	$\gamma_G = 1.35$	$\gamma_Q = 1.50$
Effet favorable	$\gamma_G = 1.00$	$\gamma_Q = 0$

Tableau 3-1

Facteurs Ψ_i :

Action variable considérée	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Charges d'exploitations	0.87	1	1
neige	0.87	1	1
vent	0.67	0.2	0
Température	0.53	0.5	0

Tableau 3-2

5 CHEMINEMENT DES CHARGES VERTICALES :

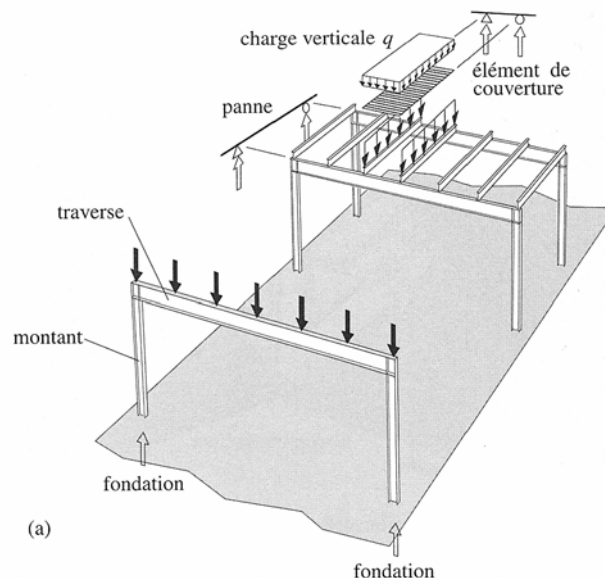


Figure 3-1

6 CHEMINEMENT DES CHARGES HORIZONTALES :

6.1 Vent sur longpan :

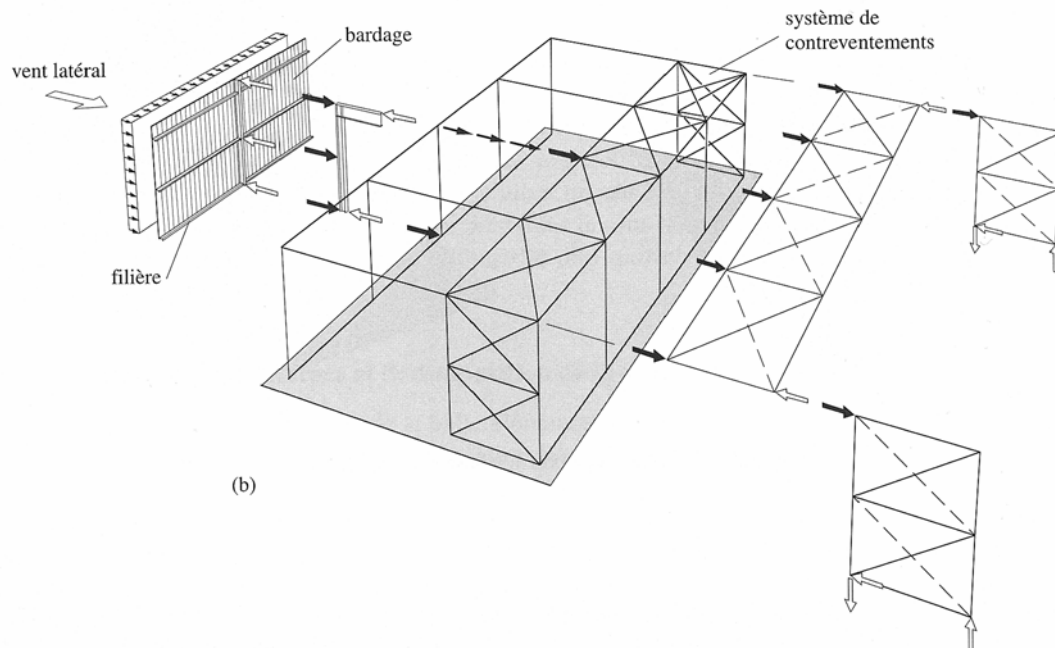


Figure 3-2

6.2 Vent sur pignon :

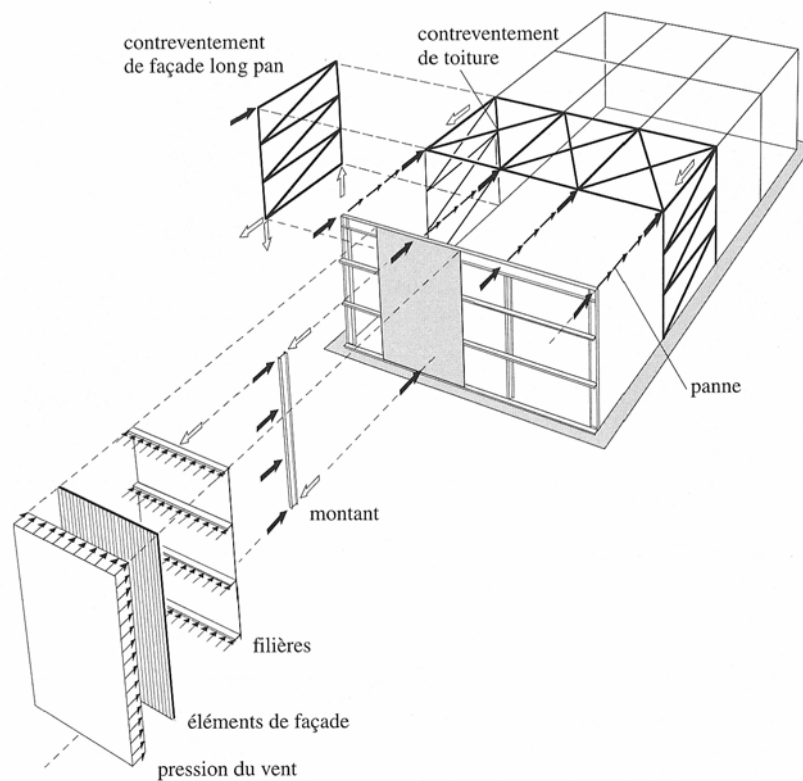


Figure 3-3

ACTIONS DU VENT SUR LES CONSTRUCTIONS COURANTES A BASE RECTANGULAIRE (METHODE SIMPLIFIEE)

1 CARACTERISTIQUES

- la construction est constituée par un bloc unique, ou des blocs accolés à toiture unique.
- La base au niveau du sol est un rectangle de longueur (a) et de largeur (b).
- La hauteur (h), différence entre le niveau de la base de la construction et le niveau de la crête de la toiture, est inférieur ou égale à 30 m
- Les dimensions doivent obligatoirement respecter les conditions suivante :
 - a) $h/a \geq 0.25$
 - b) $h/a \leq 2.5$, avec la condition supplémentaire $b/a \leq 0.4$ si $h/b > 2.5$
 - c) $f \leq h/2$ pour les toitures à deux versants plans
 - d) $f \leq 2 h / 3$ pour les toitures en voûte
- la couverture est :
 - a) soit une toiture-terrasse
 - b) soit une toiture unique de hauteur f à un ou deux versants plans inclinés au plus de 40° sur l'horizontale
 - c) soit une voûte dont le plan tangent à la naissance des directrices de la voûte est incliné au plus de 40° et au moins de 22° sur l'horizontale.
- Les parois verticales doivent :
 - a) Reposer directement sur le sol
 - b) Etre planes sans décrochements
 - c) Présenter une perméabilité $\mu \leq 5$ ou pour une seule d'entre elles $\mu \geq 35$
- La construction doit être située sur un terrain sensiblement horizontal dans un grand périmètre.

2 PRESSIONS DYNAMIQUES

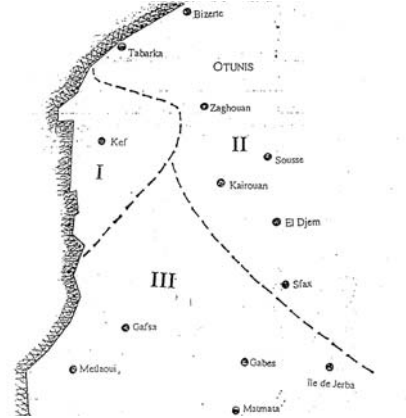
Les pressions dynamiques sont constantes sur toute la hauteur de la construction et sont données par la formule :

$$q = (46 + 0.7 h) k_r k_s \text{ [daN/m}^2\text{]}$$

k_r : coefficient de région ayant pour valeur :

	Pression normale
Région I	1.00
Région II ...	1.40
Région III	1.80

Tableau 4-1



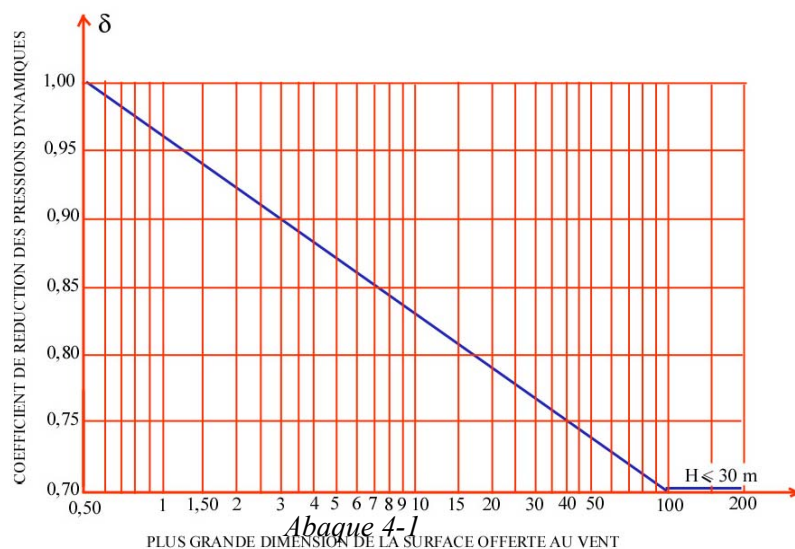
Régions du vent pour la Tunisie
Figure 4-1

K_s : coefficient de site ayant pour valeur :

	Région I	Région II	Région III
Site protégé	0.80	0.80	0.80
Site normal	1.00	1.00	1.00
Site exposé	1.35	1.30	1.25

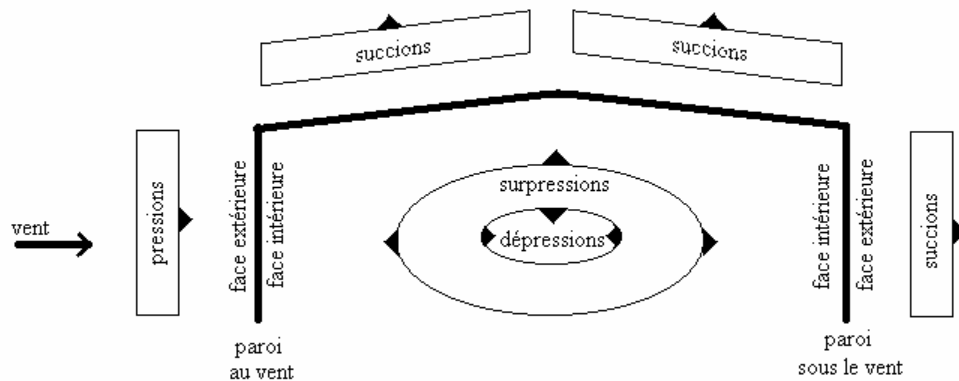
Tableau 4-2

Les pressions dynamiques doivent être affectées d'un coefficient de réduction δ donné par le diagramme suivant, en fonction de la plus grande dimension horizontale ou verticale de la surface offerte au vent, afférente à l'élément considéré dans le calcul.



Pour tous les éléments continus, le coefficient δ à adopter est celui correspondant à la plus grande dimension de la surface offerte au vent afférente à chaque travée, considérée comme librement appuyée

La totalité des réductions ne doit en aucun cas dépasser 33% , et compte tenu de ces réductions et de l'effet de site, la pression dynamique normale corrigée ne doit jamais descendre au-dessous de 30 daN/m^2 .



*Actions du vent sur un portique
Figure 4-2*

Pour toute construction, la face extérieure des parois est soumise :

- à des suctions, si les parois sont « sous le vent » ;
- à des pressions ou à des suctions, si elles sont « au vent ».

Ces actions sont dites **actions extérieures**.

Dans les constructions fermées, ouvertes ou partiellement ouvertes, les volumes intérieurs compris entre les parois peuvent être dans un état de surpression ou de dépression suivant l'orientation des ouvertures par rapport au vent et leur importance relative. Il en résulte sur les faces intérieures des actions dites **actions intérieures**.

Les actions extérieures sont caractérisées par un coefficient C_e et les actions intérieures par un coefficient C_i .

3 ACTION RESULTANTE SUR UNE PAROI :

L'action résultante sur une paroi est la combinaison des actions élémentaires unitaires sur chacune des faces de la paroi :

$$p = (C_e - C_i) q$$

4 ACTIONS EXTERIEURES

La direction du vent étant supposée normale aux parois verticales de la construction, les coefficients à prendre en compte sont les suivants :

4.1 Parois verticales

Au vent $C_e = + 0.8$

Sous le vent $C_e = - 0.5$

4.2 Toiture

4.2.1 Vent normal aux génératrices

C_e désignant le coefficient de pression moyen (versants plans) ou le coefficient de pression ponctuel (voûte) est donné par le tableau suivant où α désigne l'angle en degrés du versant avec le plan horizontal ou de la tangente à la voûte avec l'horizontale.

	$ \alpha $	Au vent	Sous le vent
		C_e	C_e
Versants plans	$0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$	$-2 \left(0.25 + \frac{ \alpha }{100} \right)$	$-1.5 \left(0.333 - \frac{ \alpha }{100} \right)$
	$10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$	$-2 \left(0.45 - \frac{ \alpha }{100} \right)$	$-0.5 \left(0.60 + \frac{ \alpha }{100} \right)$
Voûte	$0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$	$-1.8 \left(0.40 + \frac{ \alpha }{100} \right)$ avec minimum = - 0.8	$-1.8 \left(0.40 - \frac{ \alpha }{100} \right)$
	$10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$	$-2 \left(0.50 - \frac{ \alpha }{100} \right)$	$-1.8 \left(0.40 - \frac{ \alpha }{100} \right)$ avec maxi. = -0.27

*Coefficient C_e pour les toitures
Soumises à un vent normal aux génératrices
Tableau 4-3*

4.2.2 Vent parallèle aux génératrices

On adopte $C_e = -0.5$ partout.

5 ACTIONS INTERIEURES

Constructions fermées $C_i = \pm 0.3$

Constructions ouvertes ouverture au vent : $C_i = + 0.8$

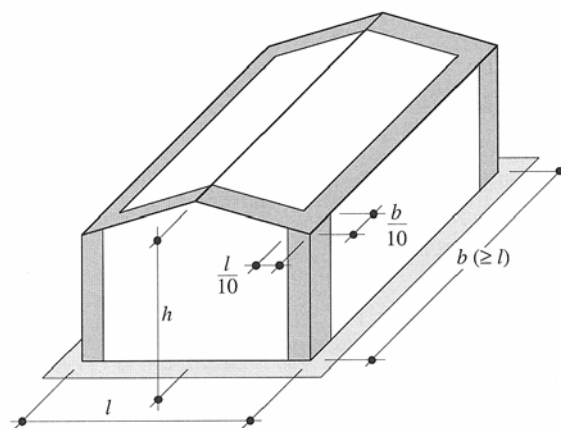
Ouverture sous le vent : $C_i = - 0.5$

6 ACTIONS LOCALES :

Les actions locales intéressent particulièrement les panneaux de remplissage, Les revêtement muraux, Les éléments de couvertures, Les pièces secondaires de charpente (chevrons, etc.) ainsi que leurs attaches et scellements, elles n'entrent pas en compte dans le calcul de l'ossature principale.

Le long des rives de toitures et des arêtes verticales, à partir de la rive ou de l'arête verticale sur une profondeur égale au dixième de la plus petite dimension horizontale b de la construction : $c = 2 C_e$. (Succion).

Aux angles dans les parties communes des zones précédentes concernant les rives de toiture : $c = 3 C_e$ (succion).



*Parties de l'enveloppe d'un bâtiment
soumises aux pressions locales du vent
Figure 4-3*

A ces actions locales s'ajoutent soit d'autres actions extérieures telles que les actions moyennes sur les faces inférieures des débords de toiture, soit les actions intérieures, sans que le coefficient résultant puisse dépasser respectivement - 2 ou - 3.

7 ACTIONS D'ENSEMBLE :

Elles sont obtenues par la composition géométrique des actions résultantes totales sur les différentes parois de la construction.

Les actions extérieures locales ne sont pas à retenir pour l'évaluation des actions d'ensemble.

ACTIONS DE LA NEIGE SUR LES CONSTRUCTIONS

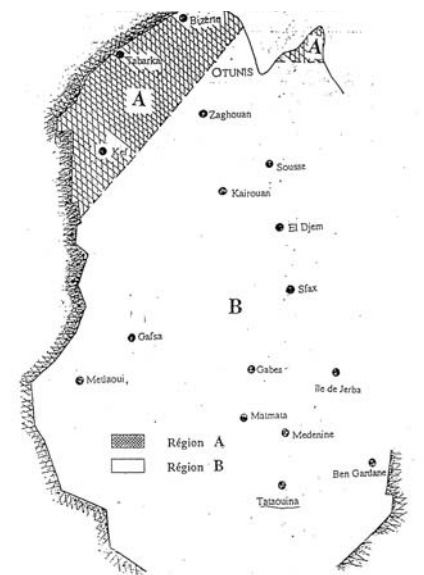
1 INTRODUCTION

Le calcul des actions de la neige sur les constructions consiste à définir les valeurs représentatives de la charge de neige sur toute surface située au-dessus du sol et soumise à l'accumulation de la neige, et notamment sur les toitures.

2 CHARGE DE NEIGE SUR LE SOL

h : altitude [m]	S_0 : valeur de la charge [KN/m^2]
$h < 200$ m	$S_{0 \min} = 0.45 \text{ KN/m}^2$ région A
$200 \text{ m} < h \leq 500$ m	$S_0 = S_{0 \min} + \left(\frac{0.15h-30}{100} \right)$
$500 \text{ m} < h \leq 1000$ m	$S_0 = S_{0 \min} + \left(\frac{0.3h-105}{100} \right)$
$1000 \text{ m} < h \leq 2000$ m	$S_0 = S_{0 \min} + \left(\frac{0.45h-255}{100} \right)$
$h > 2000$ m	Le marché doit préciser la valeur de charge de neige à prendre en compte

Tableau 5-1



Régions de neige pour la Tunisie

Figure 5-1

3 CHARGE DE NEIGE SUR LES TOITURES OU AUTRES SURFACES

$$S = \mu S_0 + S_1$$

S : valeur de la charge.

μ : coefficient nominal fonction de la forme de la toiture.

S_0 : valeur de la charge de neige sur le sol.

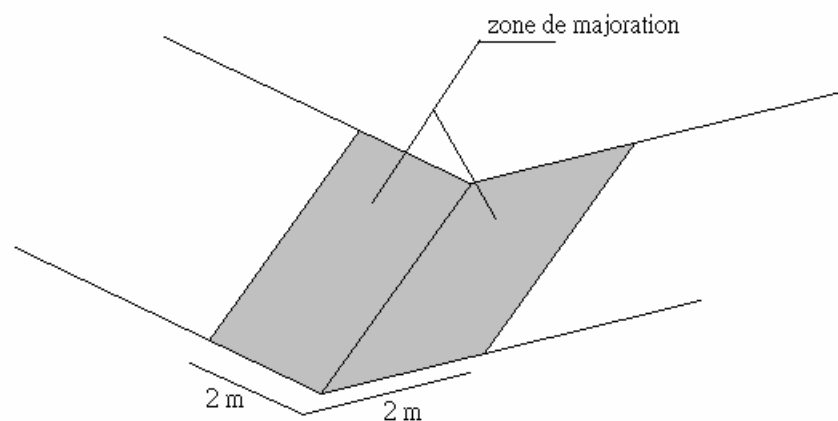
S_1 : majoration de la charge de neige.

S_1	i : pente nominale du fil de l'eau de la partie enneigée de toiture
0.2 KN/m^2	$i \leq 3 \%$
0.1 KN/m^2	$3 \% < i \leq 5 \%$
0	$i > 5 \%$

Majoration de la charge de neige en fonction de la pente nominale du fil de l'eau

Tableau 5-1

La zone de majoration s'étend dans toutes les directions sur une distance de 2 m au-delà de la partie de toiture visée ci-dessus.



Zone de majoration de la charge de neige

Figure 5-2

3.1 Facteurs influençant les valeurs de μ :

- la disposition géométrique du bâtiment, la nature des matériaux, l'isolation thermique, les « singularités » de la toiture.
- L'environnement climatique : durée de la saison de neige, ensoleillement, fonte de la neige et regel, vent ;
- La topographie locale et, en particulier, les conditions d'abri dues aux bâtiments voisins, aux arbres, ... ;
- Les actions particulières telles que l'enlèvement de la neige par les usagers.

Il n'est, en général, pas possible de tenir compte, dans les calculs, de tous ces facteurs. Les plus importants sont la géométrie de la toiture et le vent, ce dernier intervenant dans les coefficients μ par sa direction, sa grandeur et sa durée.

3.2 Cas de charge :

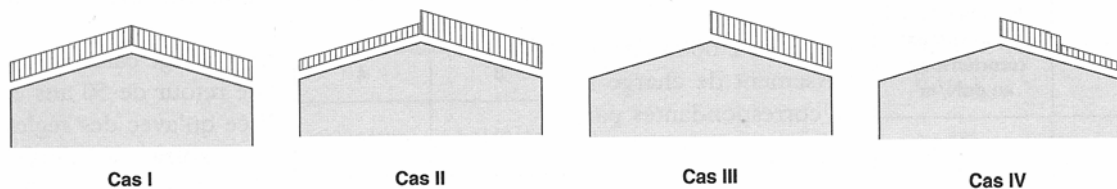
Pour une toiture de forme donnée, les différents cas de charge à considérer sont les suivants :

CAS I : charge de neige répartie sans redistribution par le vent.

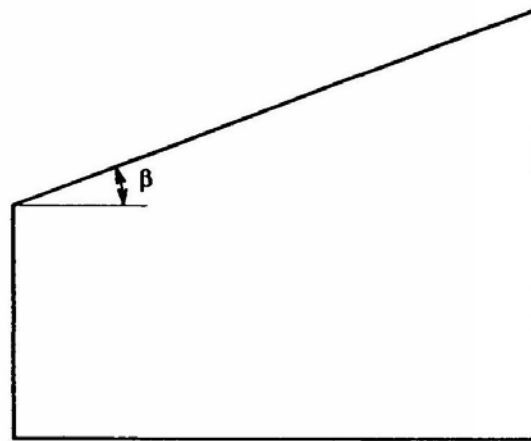
CAS II : charge de neige répartie après redistribution par le vent.

CAS III : charge de neige répartie après redistribution et enlèvement partiel éventuel par le vent.

CAS IV : charge de neige répartie conformément aux CAS I,II,III sur une partie de la surface et moitié de cette charge répartie sur le reste de la surface, de manière à produire l'effet le plus défavorable dans l'élément considéré.

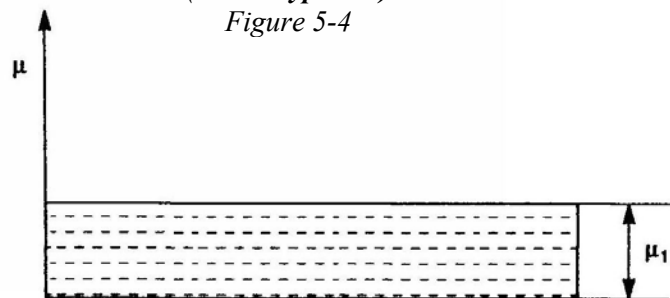


*Schémas de répartition de la charge de neige
suivant les règles N84
Figure 5-3*



*Toitures simples à un versant plan
(toiture type A.1)*

Figure 5-4



Cas 1

I,1 Toitures courantes

$0 \leq \beta \leq 30^\circ$	$\mu_1 = 0,8$
$30^\circ < \beta < 60^\circ$	$\mu_1 = 0,8 - 0,8 \left(\frac{\beta - 30}{30} \right)$
$\beta \geq 60^\circ$	$\mu_1 = 0$

I,2 Toitures avec dispositifs² de retenue

$0 \leq \beta \leq 45^\circ$	$\mu_1 = 0,8$
$45^\circ < \beta < 75^\circ$	$\mu_1 = 0,8 - 0,8 \left(\frac{\beta - 45}{30} \right)$
$\beta \geq 75^\circ$	$\mu_1 = 0$

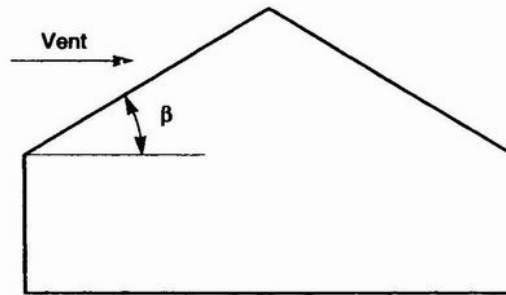
Cas II

Sans objet (couvert par le cas I).

Cas III

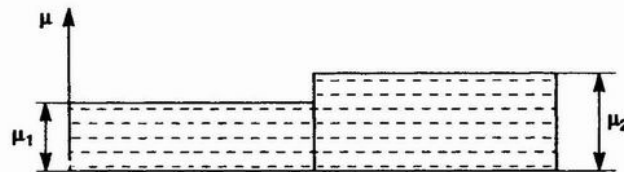
- Si la toiture est au vent : sans objet ($\mu_1 = 0$).
- Si la toiture est sous le vent :
 - si $\beta \leq 15^\circ$: sans objet ($\mu_1 = 0$).
 - si $\beta > 15^\circ$: les valeurs de μ_1 sont celles du cas I.

2. Il s'agit de dispositifs tels que crochets, barres à neige intéressant l'ensemble de la surface et empêchant ou réduisant le glissement de la neige en fonction de la pente.



Toitures simples à deux versants plans

Figure 5-5

Cas ILes valeurs de μ sont celles du cas I de la toiture type A.1.**Cas II****II.1 Toiture courantes**

$0 \leq \beta \leq 15^\circ$	$\mu_1 = \mu_2 = 0,8$
$15^\circ < \beta \leq 30^\circ$	$\mu_1 = 0,8 - 0,4 \left(\frac{\beta - 15}{15} \right)$ $\mu_2 = 0,8 + 0,4 \left(\frac{\beta - 15}{15} \right)$
$30^\circ < \beta \leq 60^\circ$	$\mu_1 = 0,4 - 0,4 \left(\frac{\beta - 30}{30} \right)$ $\mu_2 = 1,2 - 1,2 \left(\frac{\beta - 30}{30} \right)$
$\beta > 60^\circ$	$\mu_1 = \mu_2 = 0$

avec les limitations suivantes :

pour $22,5^\circ < \beta < 35^\circ$ $\mu_2 = 1$ **II.2 Toitures avec dispositifs de retenue**

$0 \leq \beta \leq 15^\circ$	$\mu_1 = \mu_2 = 0,8$
$15^\circ < \beta \leq 45^\circ$	$\mu_1 = 0,8 - 0,4 \left(\frac{\beta - 15}{30} \right)$ $\mu_2 = 0,8 + 0,4 \left(\frac{\beta - 15}{30} \right)$
$45^\circ < \beta \leq 75^\circ$	$\mu_1 = 0,4 - 0,4 \left(\frac{\beta - 45}{30} \right)$ $\mu_2 = 1,2 - 1,2 \left(\frac{\beta - 45}{30} \right)$
$\beta > 75^\circ$	$\mu_1 = \mu_2 = 0$

avec les limitations suivantes :

pour $30^\circ < \beta < 50^\circ$ $\mu_2 = 1$ **Cas III**

- Si $\beta \leq 15^\circ$: sans objet ($\mu_2 = 0$).
- Si $\beta > 15^\circ$: les valeurs de μ_2 sont celles du cas II.

Les valeurs de μ_1 sont nulles.

3. Dans le cas de toitures asymétriques à deux plans, chaque côté de la toiture doit être considéré comme une moitié d'une toiture symétrique correspondante.

ETUDE DES ELEMENTS FLECHIS

1 CHOIX ENTRE ANALYSE PLASTIQUE ET ANALYSE ELASTIQUE

Les sollicitations dans une structure isostatique sont obtenues en utilisant les équations de la statique.

Dans une structure hyperstatique, les sollicitations peuvent, en général, être déterminées par l'une des méthodes d'analyse suivantes :

- Analyse globale élastique.
- Analyse globale plastique.

L'analyse globale élastique peut être utilisée dans tous les cas.

Diverses conditions doivent être respectées pour que l'analyse plastique Soit envisageable.

- L'acier doit avoir une limite de rupture supérieure d'au moins 20% à la limite d'élasticité, un allongement à rupture d'au moins 15% et une déformation plastique ultime supérieure à 20 fois la déformation élastique ; tous les aciers usuels de construction métalliques satisfont ces conditions sans difficulté:

$$F_u/F_y > 1,2 \quad A \% > 15 \% \quad \epsilon_u > 20 \epsilon_y$$

- Les sections transversales des éléments au droit et dans le voisinage des rotules plastiques doivent être de Classe 1 de façon à pouvoir développer, sans risque de voilement local, les déformations plastiques attendues, tout en équilibrant les sollicitations correspondant à leur capacité plastique.
 - Les assemblages au droit et dans le voisinage des rotules plastiques doivent présenter une capacité de déformation équivalente à celle de l'élément attaché ou, à défaut, présenter une capacité résistante supérieure d'au moins 20% par rapport à celle de cet élément.
 - Les tronçons affectés par les plastifications doivent comporter un maintien latéral contre le déversement à la fois au droit et de part et d'autre de leurs sections plastifiées.
- Peu d'ossatures courantes réunissent ces différentes caractéristiques et, de ce fait, le calcul en élasticité est le plus souvent suffisant pour les optimiser, notamment quand

elles sont constituées d'éléments en I qui, par la géométrie de leur section transversale, offrent déjà en élasticité un très bon rendement en flexion.

2 CLASSIFICATION DES SECTIONS TRANSVERSALES

Les sections transversales sont répertoriées en 4 classes par l'E.C.3.

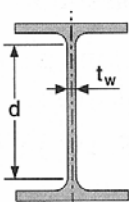
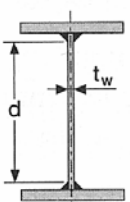
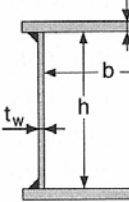
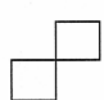
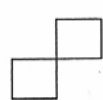
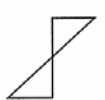
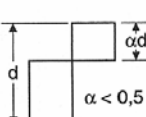
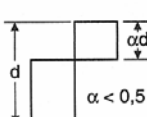
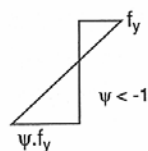
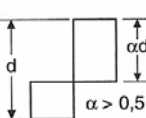
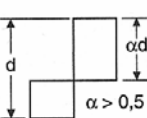
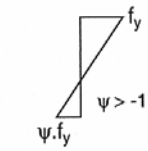
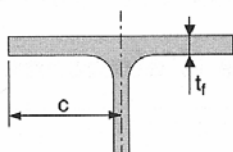
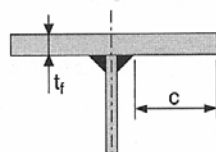
Ce classement est effectué selon des critères divers :

- élancements des parois,
- résistance de calcul,
- capacité de rotation plastique,
- risque de voilement local, etc...

Le fait de déterminer la classe d'une section permet d'avoir des renseignements sur son comportement et sa résistance et donc permet de choisir la méthode de calcul adaptée.

Classe	Méthode de calcul
1	Plastique (autorisant la formation d'une rotule plastique)
2	Plastique (pas de rotule)
3	Elastique sur section complète
4	Elastique sur section efficace

*Méthode de calcul en fonction
de la classe de section transversale
Tableau 6-1*

Parois avec deux bords appuyés				
$\frac{d}{t_w}$ $\frac{b}{t_f} \text{ ou } \frac{h}{t_w}$ $\frac{b-3t}{t} \text{ ou } \frac{h-3t}{t}$				
DIAGRAMMES		CLASSES		
		1	2	3
Symétrique		 72 ε	 83 ε	 124 ε
	Compression uniforme	 33 ε	 38 ε	 42 ε
Quelconque	Traction prédominante	 $\alpha < 0,5$ 36ε/α	 $\alpha < 0,5$ 41,5ε/α	 $\psi < -1$ 62ε(1-ψ)√(-ψ)
	Compression prédominante	 $\alpha > 0,5$ 396ε/(13α-1)	 $\alpha > 0,5$ 456ε/(13α-1)	 $\psi > -1$ 42ε/(0,67+0,33ψ)
Parois avec un bord libre et un bord appuyé				
$\frac{b}{t_f}$ 				
DIAGRAMME DE COMPRESSION UNIFORME		CLASSES		
		1	2	3
Section laminée		10 ε	11 ε	15 ε
Section soudée		9 ε	10 ε	14 ε

f_y en N/mm ²	235	275	355
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	1,00	0,92	0,81

Limites pratiques d'élancement géométrique des parois
Tableau 6-2

3 FLEXION SIMPLE (M) :

En l'absence d'effort tranchant, le moment fléchissant M dans chaque section transversale doit rester inférieur au moment résistant, soit : $M \leq M_R$.

- Pour les sections de classe 1 ou 2 :

$$M_R = M_{pl} = \frac{w_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad : \text{Moment résistant plastique}$$

- Pour les sections de classe 3 :

$$M_R = M_{el} = \frac{w_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad : \text{Moment résistant élastique.}$$

- Pour les sections de classe 4 :

$$M_R = M_0 = \frac{w_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad : \text{Moment résistant au voilement local.}$$

4 FLEXION SIMPLE ET EFFORT TRANCHANT (M + V) :

Le moment fléchissant doit vérifier : $M \leq M_R$ si $V < 0.5 V_{pl}$.

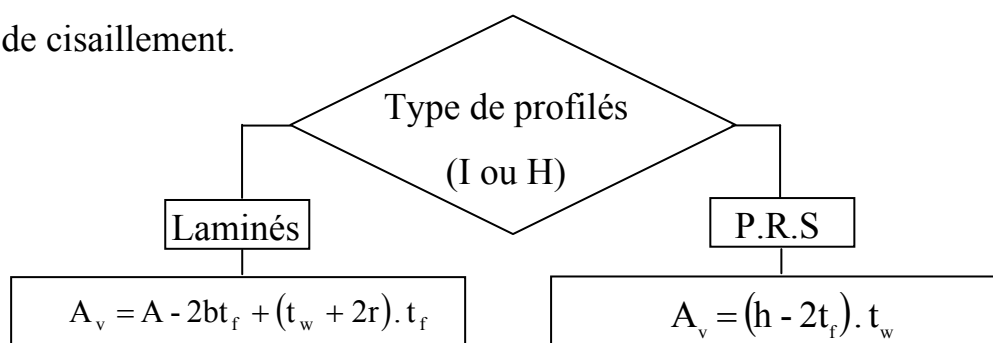
ou $M \leq M_v \leq M_R$ si $V \geq 0.5 V_{pl}$.

$$M_v = \left[w_{pl} - \frac{\rho A_v^2}{4t_w} \right] \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\rho = \left[\frac{2V}{V_{pl}} - 1 \right]^2$$

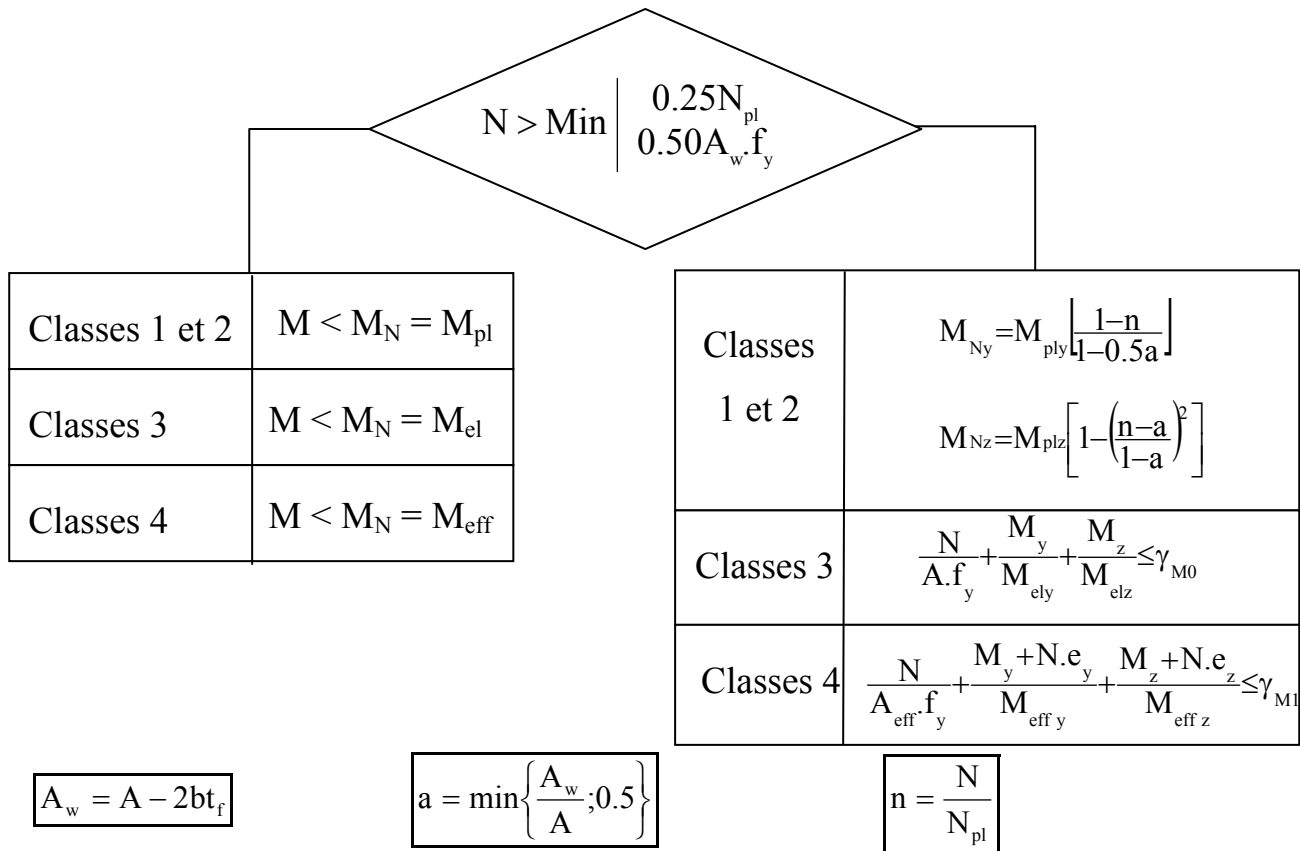
$$V_{pl} = \frac{f_y \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

A_v : aire de cisaillement.



5 FLEXION COMPOSEE SEULE (M + N) :

Le moment fléchissant doit vérifier : $M \leq M_N$



6 MOMENT DE FLEXION, EFFORT TRANCHANT ET EFFORT AXIAL (M + V + N)

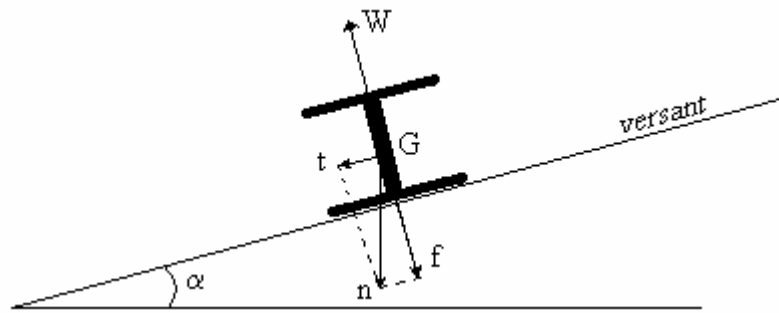
Lorsque l'effort tranchant dépasse la moitié de l'effort tranchant résistant plastique, il faut prendre en compte son effet, ainsi que celui de l'effort axial, pour calculer le moment résistant plastique réduit.

- Si $V < 0.5 V_{pl} \rightarrow$ résistance de calcul sous (M) ou (M+N).
- Si $V \geq 0.5 V_{pl} \rightarrow$ la résistance de calcul de la section transversale aux combinaisons de moment et effort axial doit être calculée en utilisant une limite d'élasticité réduite f_{red} pour l'aire de cisaillement A_v .

Avec :

$$f_{red} = (1 - \rho) \cdot f_y \quad \text{et} \quad \rho = \left(\frac{2V}{V_{pl}} - 1 \right)^2$$

7 FLEXION DEVIEE :



Panne sur versant incliné

Figure 6-1

7.1 Calcul en élasticité (sections de classe 3)

- Les moments de flexion maximaux sont : M_y et M_z

- Les contraintes de flexion sont :

$$\sigma_{fy} = \frac{M_y}{W_y} \quad \text{et} \quad \sigma_{fz} = \frac{M_z}{W_z}$$

- On vérifie que :

$$\sigma_{fy} + \sigma_{fz} \leq f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_0}$$

- On vérifie la condition de flèche :

$$f \leq \frac{L}{200}$$

En cas d'effort axial N , il faut vérifier que :

$$\left(\frac{N}{A \cdot f_{yd}} \right) + \left(\frac{M_y}{W_y \cdot f_{yd}} \right) + \left(\frac{M_z}{W_z \cdot f_{zd}} \right) \leq 1$$

7.2 Calcul en plasticité (sections de classes 1 et 2)

S'agissant de flexion déviée (bi-axiale), il faut vérifier que :

$$\left(\frac{M_y}{M_{ply}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_z}{M_{plz}} \right)^\beta \leq 1$$

Où α et β sont des constantes :

	α	β
Du côté de la sécurité	1	1
Section en I et H	2	$5n \geq 1$
Tubes circulaires	2	2

Tableau 6-3

Avec : $n = \frac{N}{N_{pl}}$ où N est l'effort normal, lors qu'il est nul $\beta = 1$.

Les pannes soumises à un effort N sont les pannes adjacentes à un pignon (situées en travée de rive) ou des pannes formant montants des poutres au vent, qui transmettent des efforts normaux dus aux efforts du vent sur les pignons de bâtiment.

NOTATIONS :

N_R : effort résistant (compression/traction).

N_{pl} : résistance plastique de la section brute.

N_0 : résistance de calcul de la section brute au voilement local

N_u : résistance ultime de la section nette au droit des trous de fixation

N_{net} : résistance plastique de la section nette pour les assemblages par B.P à ELU

M_R : moment résistant

M_{pl} : moment résistant plastique.

M_{el} : moment résistant élastique.

M_0 : moment résistant au voilement local.

M_v : moment résistant plastique réduit du fait de l'effort tranchant.

A_{eff} : aire efficace de la section

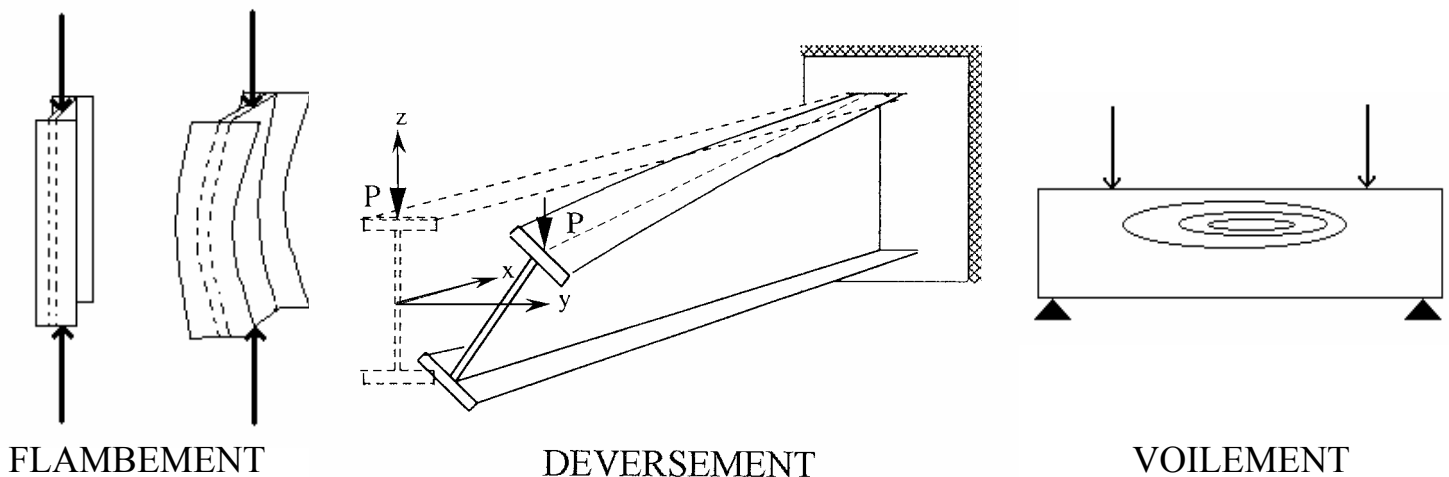
A_v : aire de cisaillement.

LES PHENOMENES D'INSTABILITE ELASTIQUE

1 INTRODUCTION

Le calcul d'une structure exige que, sous toutes les combinaisons d'actions possibles, définies réglementairement, la stabilité reste assurée. Il s'agit donc de vérifier que les contraintes et les déformations restent en dessous des limites admissibles.

- Dans le cas des petites déformations, il suffit simplement de vérifier que les contraintes restent inférieures à la contrainte de ruine.
- Dans le cas des grandes déformations, il faut vérifier :
 - Le flambement : phénomène très dangereux, il affecte les pièces simplement comprimées ainsi que les pièces comprimées et fléchies.
 - Le déversement : moins dangereux, il affecte les semelles comprimées des pièces fléchies.
 - Le voilement : de moindre importance, il affecte les âmes des pièces



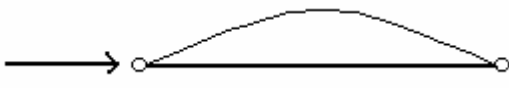
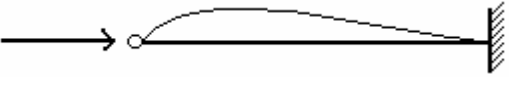
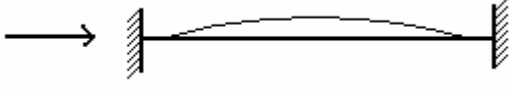
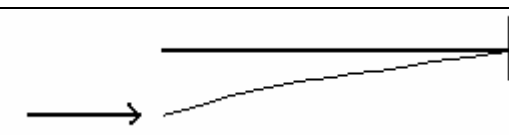
Les phénomènes d'instabilité élastique

Figure 7-1

2 FLAMBEMENT

On définit : l_0 : longueur réelle de la barre

l_k : longueur de flambement de la barre

CONDITIONS D'APPUIS	l_k
	l_0
	$0.7 l_0$
	$0.5 l_0$
	$2 l_0$

Longueur de flambement
Tableau 7-1

i : rayon de giration : $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ avec I : inertie

λ : élancement : $\lambda = \frac{l_k}{i}$

λ_k : élancement critique $\lambda_k = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ avec E : module d'Young

$\bar{\lambda}$: élancement réduit : $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_k}$

2.1 Flambement simple

Le risque de flambement n'est à considérer que si : $\bar{\lambda} > 0.2$

En ce cas, la sollicitation N de compression simple doit satisfaire à :

$$N \leq \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

	β_A	γ_{M1}
Classe 1, 2 et 3	1	1.1
Classe 4	$\frac{A_{eff}}{A}$	1.1

Tableau 7-2

χ : est le coefficient de réduction qu'on peut déterminer à partir du tableau suivant en fonction du mode de flambement à considérer.

Coefficients de réduction				
$\bar{\lambda}$	Valeurs de χ pour la courbe de flambement			
	a	b	c	d
0,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,3	0,9775	0,9641	0,9491	0,9235
0,4	0,9528	0,9261	0,8973	0,8504
0,5	0,9243	0,8842	0,8430	0,7793
0,6	0,8900	0,8371	0,7854	0,7100
0,7	0,8477	0,7837	0,7247	0,6431
0,8	0,7957	0,7245	0,6622	0,5797
0,9	0,7339	0,6612	0,5998	0,5208
1,0	0,6656	0,5970	0,5399	0,4671
1,1	0,5960	0,5352	0,4842	0,4189
1,2	0,5300	0,4781	0,4338	0,3762
1,3	0,4703	0,4269	0,3888	0,3385
1,4	0,4179	0,3817	0,3492	0,3055
1,5	0,3724	0,3422	0,3145	0,2766
1,6	0,3332	0,3079	0,2842	0,2512
1,7	0,2994	0,2781	0,2577	0,2289
1,8	0,2702	0,2521	0,2345	0,2093
1,9	0,2449	0,2294	0,2141	0,1920
2,0	0,2229	0,2095	0,1962	0,1766
2,1	0,2036	0,1920	0,1803	0,1630
2,2	0,1867	0,1765	0,1662	0,1508
2,3	0,1717	0,1628	0,1537	0,1399
2,4	0,1585	0,1506	0,1425	0,1302
2,5	0,1467	0,1397	0,1325	0,1214
2,6	0,1362	0,1299	0,1234	0,1134
2,7	0,1267	0,1211	0,1153	0,1062
2,8	0,1182	0,1132	0,1079	0,0997
2,9	0,1105	0,1060	0,1012	0,0937
3,0	0,1036	0,0994	0,0951	0,0882

Coefficient de réduction χ

Tableau 7-3

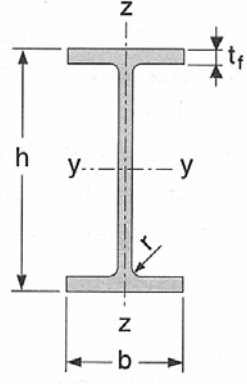
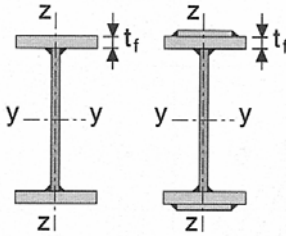
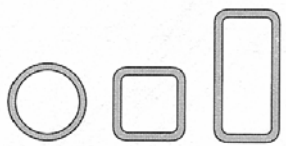
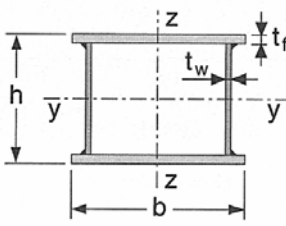
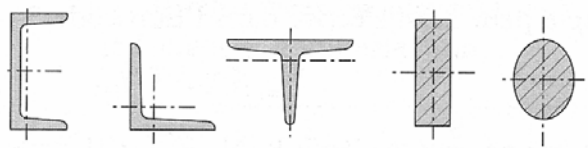
Choix de la courbe de flambement correspondant à une section			
Type de section	Limites	Axe de flambement	Courbe de flambement
Sections en I laminées 	$h/b > 1,2$: $t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a b
	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c
	$h/b \leq 1,2$: $t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z y - y z - z	b c d d
Sections en I soudées 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	b c
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y - y z - z	c d
Sections creuses 	laminées à chaud	quel qu'il soit	a
	formées à froid en utilisant f_{yb}	quel qu'il soit	b
	formées à froid en utilisant f_{ya}	quel qu'il soit	c
Caissons soudés 	D'une manière générale (sauf ci-dessous)	quel qu'il soit	b
	Soudures épaisses et $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	y - y z - z	c c
Sections en U, L, T et sections pleines 		quel qu'il soit	c

Tableau 7-4

2.2 Flambement flexion (sans risque de déversement)

Les éléments sollicités simultanément en flexion et en compression axiale, doivent satisfaire à diverses conditions, selon la classe de leur section transversale.

2.2.1 Sections de classes 1 et 2

$$\frac{N}{\chi_{\min} \frac{N_{pl}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_y \cdot M_y}{\frac{M_{ply}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z \cdot M_z}{\frac{M_{plz}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$N_{pl} = A \cdot f_y$$

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N}{\chi_y A f_y} \quad \text{avec } k_y \leq 1.5$$

$$\mu_y = \bar{\lambda}_y (2\beta_{My} - 4) + \left(\frac{W_{ply} - W_{ely}}{W_{ely}} \right) \quad \text{avec } \mu_y \leq 0.9$$

$$K_z = 1 - \frac{\mu_z N}{\chi_z A f_y} \quad \text{avec } K_z \leq 1.5$$

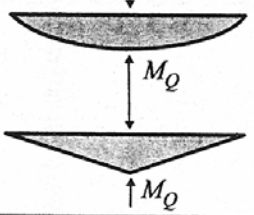
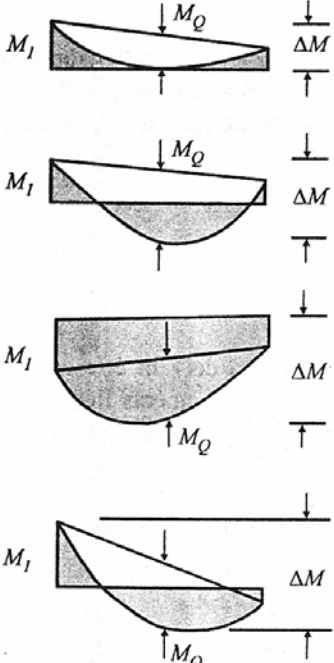
$$\mu_z = \bar{\lambda}_z (2\beta_{Mz} - 4) + \left(\frac{W_{plz} - W_{elz}}{W_{elz}} \right) \quad \text{avec } \mu_z \leq 0.9$$

$$\chi_{\min} = \min \{ \chi_y, \chi_z \} \quad : \text{coefficients de réduction}$$

β_{My} et β_{Mz} sont les facteurs de moment uniforme équivalent pour le flambement par flexion.

2.2.2 Sections de classe 3

Les formules établies pour les sections 1 et 2 restent valables à la condition de remplacer $M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y$ par $M_{el} = W_{el} \cdot f_y$

Diagramme de moment	Facteur de moment uniforme équivalent β_M
Moments d'extrémités  $-1 \leq \psi \leq 1$	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \psi$
Moments dûs à des charges transversales 	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
Moments dûs à des charges transversales plus des moments d'extrémités 	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ $M_Q = \max M$ dû aux charges transversales seulement $\Delta M = \begin{cases} \max M & \text{pour diagramme de moment sans changement de signe} \\ \max M + \min M & \text{pour diagramme de moment avec changement de signe} \end{cases}$

Facteurs de moment uniforme équivalent
Tableau 7-5

LES ASSEMBLAGES EN CONSTRUCTION METALLIQUE

1 INTRODUCTION

Une structure métallique est un ensemble de pièces individuelles assemblées.

Il existe deux possibilités d'assemblage :

- Assemblage des pièces bout à bout :

Joint de continuité
de poutre par éclisses et
boulons précontraints

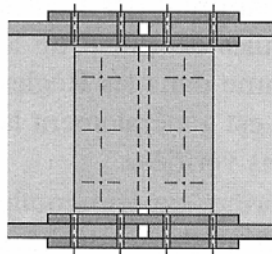
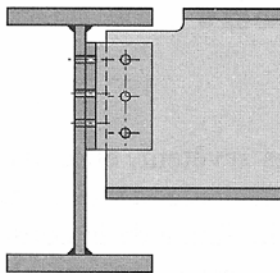


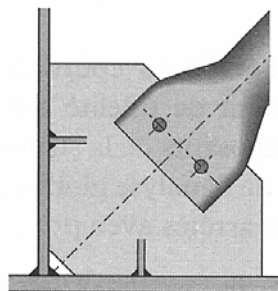
Figure 8-1

- Assemblage des pièces concourantes

Appui simple poutre-poutre
par cornières boulonnées



Attache boulonnée
d'un tube circulaire écrasé,
sur gousset soudé



Encastrement poutre-poteau
par platine d'about
boulonnée

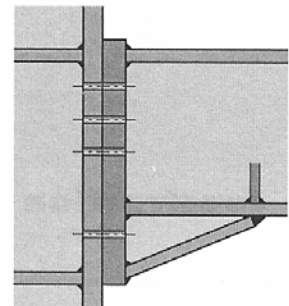


Figure 8-2

Le rôle d'un assemblage est :

- Réunir et solidariser plusieurs pièces entre elles.
- Assurer la répartition et la transmission des diverses sollicitations entre les pièces assemblées sans générer des sollicitations parasites.

2 FONCTIONNEMENT DES ASSEMBLAGES

2.1 Fonctionnement par obstacle

C'est le cas des boulons ordinaires, non précontraint, dont les tiges reprennent les efforts et fonctionnent en cisaillement.

2.2 Fonctionnement par adhérence des pièces assemblées

Dans ce cas, la transmission des efforts s'opère par adhérence des surfaces des pièces en contact. Cela concerne le soudage, le collage, le boulonnage par boulons HR

2.3 Fonctionnement mixte

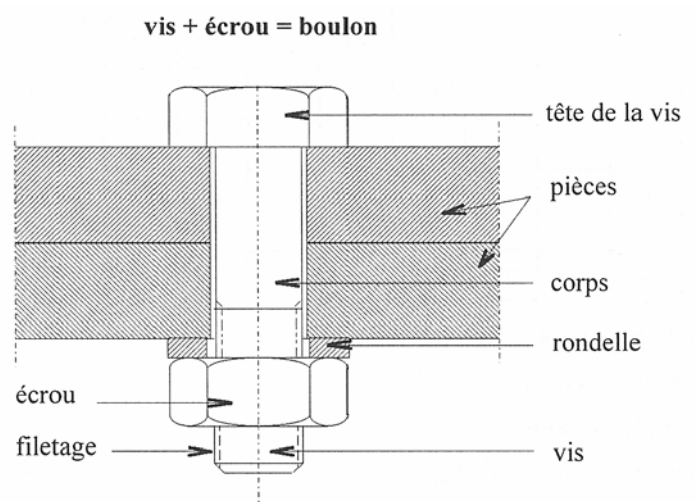
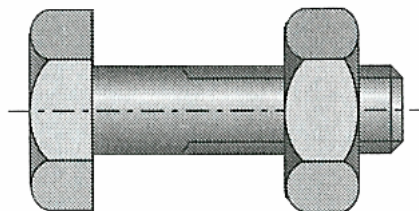
C'est le cas du rivetage (et dans les cas extrêmes des boulons HR), à savoir que les rivets assurent la transmission des efforts par adhérence des pièces jusqu'à une certaine limite, qui lorsqu'elle est dépassée, fait intervenir les rivets par obstacle, au cisaillement.

3 LES ASSEMBLAGES BOULONNES

3.1 Composition :

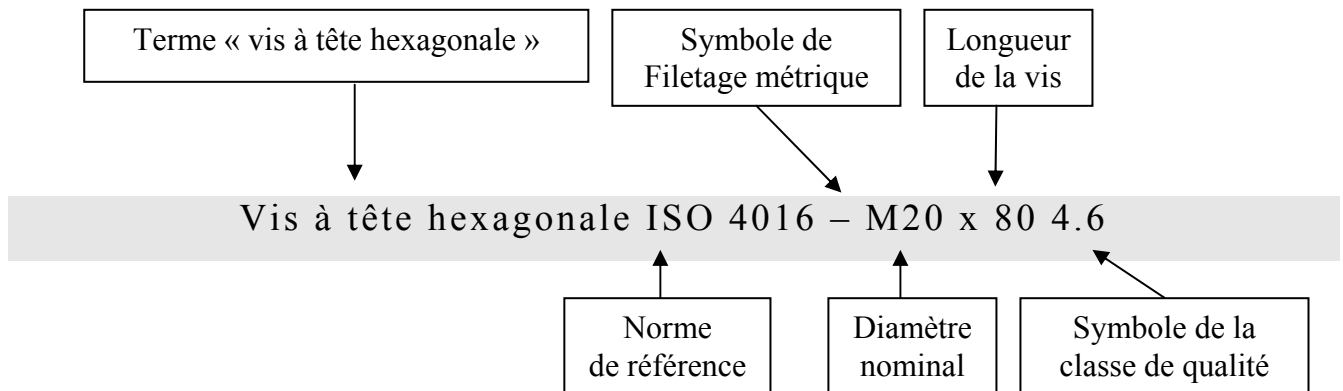
Les boulons sont constitués de :

- Une vis
- Un écrou hexagonal.
- Eventuellement 1 ou 2 rondelles.

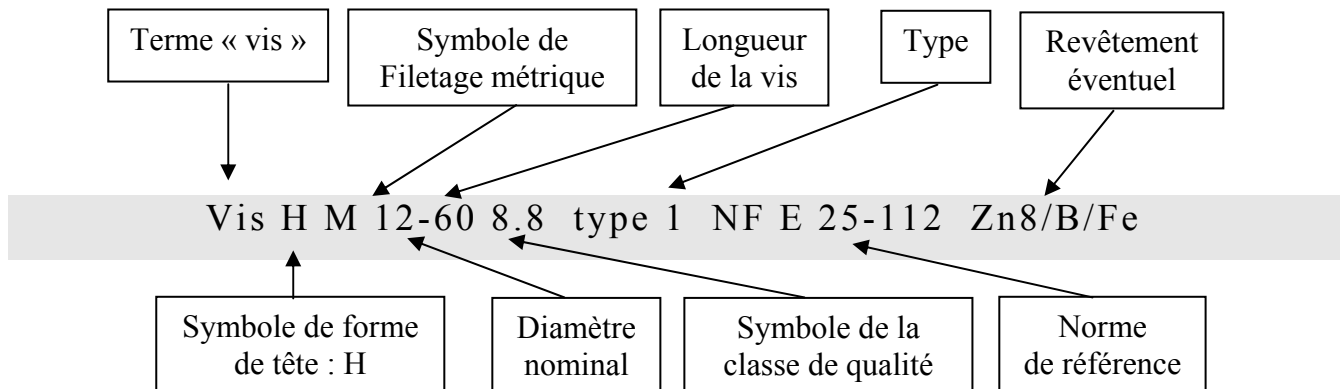


Terminologie
Figure 8-3

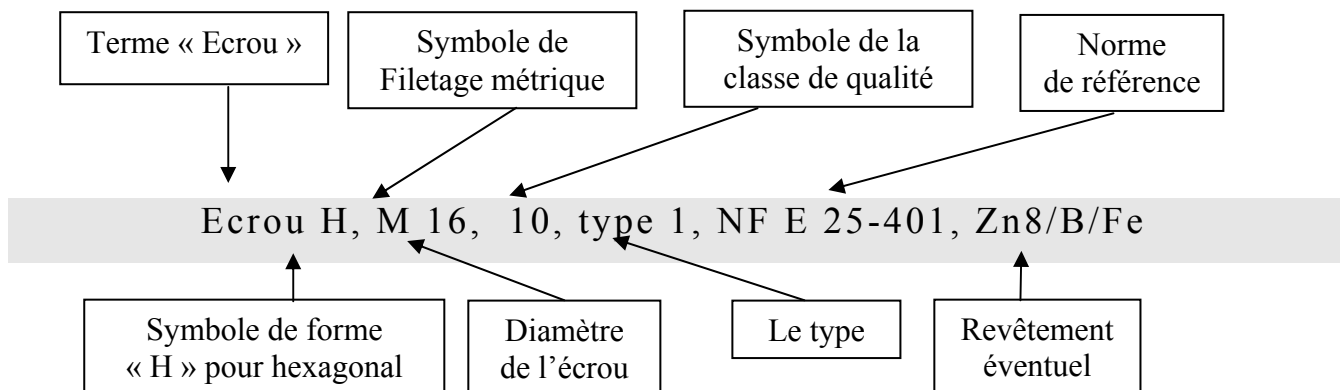
3.1.1 Désignation des vis selon les normes internationales ISO :



3.1.2 Désignation des vis selon la norme Française NF E 25-004 :



3.1.3 Désignation des écrous selon la norme Française NF E 25-004 :

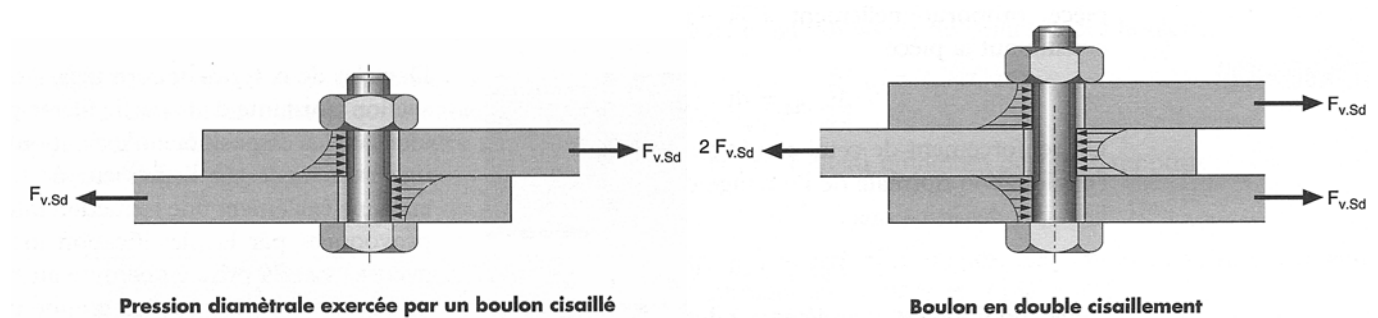


3.2 Dimensionnement des boulons ordinaires :

3.2.1 Assemblages sollicités au cisaillement:

Dans ce cas, il convient de vérifier :

- D'une part, la résistance au cisaillement des boulons,
- D'autre part, la résistance à la pression diamétrale des pièces.



Assemblages sollicités au cisaillement
Figure 8-4

Résistance des boulons au cisaillement par plan de cisaillement :

- pour les classes de qualité 4.6 , 5.6 , 6.6 et 8.8 :

$$F_V = 0.6 f_{ub} \frac{A_s}{\gamma_{Mb}}$$

- pour les classes de qualité 4.8 , 5.8 , 6.8 et 10.9 :

$$F_V = 0.5 f_{ub} \frac{A_s}{\gamma_{Mb}}$$

A_s : aire de la section résistante en traction du boulon, si le plan de cisaillement passe par la partie fileté du boulon.

f_{ub} : Contrainte limite de résistance à la traction des boulons.

$\gamma_{Mb} = 1.25$ coefficient de sécurité pour le cisaillement.

Résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées :

$$F_B = 2.5 f_u d_0 \frac{t}{\gamma_{Mb}}$$

3.2.2 Assemblages sollicités à la traction:

Résistance des boulons à la traction :

$$F_T = 0.9 f_{ub} \frac{A_s}{\gamma_{Mb}}$$

3.2.3 Assemblages sollicités simultanément au cisaillement et à la traction:

Les boulons soumis à des efforts combinés de cisaillement V et de traction T , doivent satisfaire aux conditions suivantes :

$$\frac{V}{F_V} + \frac{T}{1.4F_T} \leq 1$$

Classe	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	8.8	10.9
$F_{ub} [MPa]$	400	400	500	500	600	600	800	1000

Caractéristiques mécaniques correspondants aux différentes classes
Tableau 8-1

Désignation	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
$d (mm)$	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
$A (mm^2)$	50.3	78.5	113	154	201	254	314	380	452	573	707
$A_s (mm^2)$	36.6	58	84.3	115	157	192	245	303	353	459	561

Principales caractéristiques géométriques des boulons
Tableau 8-2

d : diamètre de la partie non filetée de la vis ;

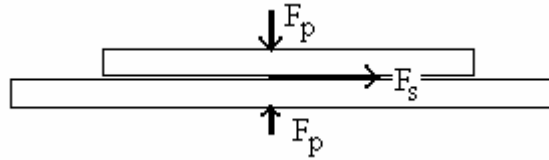
A : section nominale du boulon ;

A_s : section résistante de la partie filetée.

3.3 Dimensionnement des boulons précontraints :

Si F_p est l'effort de précontrainte axial dans un boulon et F_s l'effort de cisaillement transmis par l'assemblage et sollicitant le dit boulon, il faut vérifier que l'interface des pièces en contact puisse transmettre l'effort tangent, sans glissement, soit :

$$F_s \leq \mu \cdot F_p$$



Fonctionnement d'un boulon HR

Figure 8-5

Avec : $F_p = 0.7 f_{ub} A_s$

Le coefficient de frottement μ doit correspondre à sa valeur de calcul. Une préparation des surfaces est nécessaire, par brossage ou grenaillage, pour éliminer toute trace de rouille ou de calamine, de graisse, etc...

$\mu = 0.50$ pour les surfaces de classe A $\mu = 0.30$ pour celles de la classe C

$\mu = 0.40$ pour celles de la classe B $\mu = 0.20$ pour celles de la classe D

- **Classe A**

Surfaces décapées par grenaillage ou sablage, avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes et sans piqûres de corrosion ;

Surfaces décapées par grenaillage ou sablage et métallisées par projection d'aluminium ;

Surfaces décapées par grenaillage ou sablage et métallisées par projection d'un revêtement à base de Zinc, garanti d'assurer un coefficient de glissement qui ne soit pas inférieur à 0,5.

- **Classe B** : Pas de recommandation.

- **Classe C**

Surfaces nettoyées par brossage métallique ou à la flamme avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes.

- **Classe D** : Surfaces non traitées.

3.3.1 Caractéristiques mécaniques des boulons :

Il existe deux classes de boulons HR, définies en fonction de leur contrainte limite d'élasticité f_{yb} et de leur contrainte de rupture f_{ub} :

- les boulons HR 1 ou HR 10.9
- les boulons HR 2 ou HR 8.8

Le premier chiffre correspond à $f_{ub} / 100$

Le second chiffre correspond à $10 f_{yb} / f_{ub}$

Repère	Appellation	f_{ub} (MPa)	F_{yb} (MPa)
HR 1	HR 10.9	1000	900
HR 2	HR 8.8	800	640

Principales caractéristiques mécaniques des boulons HR
Tableau 8-3

3.3.2 Assemblage résistant au glissement :

La résistance au glissement F_s d'un boulon HR précontraint vaut :

$$F_s = k_s m \mu F_p / \gamma_{MS}$$

Avec:

F_p est la force de précontrainte, telle que définie au paragraphe suivant,

μ est le coefficient de frottement des pièces,

m est le nombre d'interfaces de frottement,

k_s est un coefficient fonction de la dimension des trous de perçage et vaut :

$k_s = 1$ pour les trous de tolérances normales, à savoir :

1 mm pour les boulons Ø 12 et Ø 14

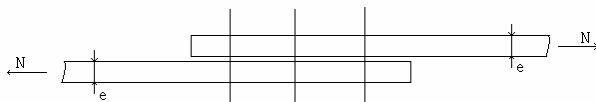
2 mm pour les boulons Ø 16 et Ø 24

3 mm pour les boulons Ø 27 et plus

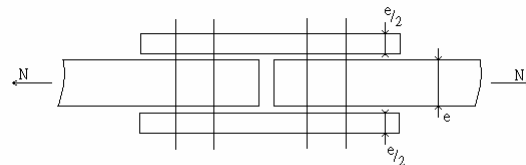
4 PRECAUTIONS CONSTRUCTIVES

Les assemblages constituent des zones particulières plus fragiles que les zones courantes des pièces, car les sections sont réduites du fait des perçages ou la nature de l'acier affaiblie par la chauffe du soudage.

Il faut proscrire (éviter) tout assemblage par recouvrement simple et utiliser un assemblage symétrique par double couvre-joint.

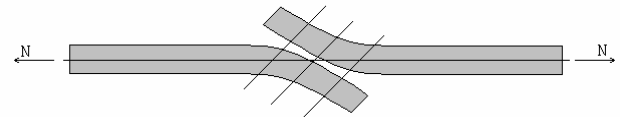


Assemblage par recouvrement simple
Figure 8-6



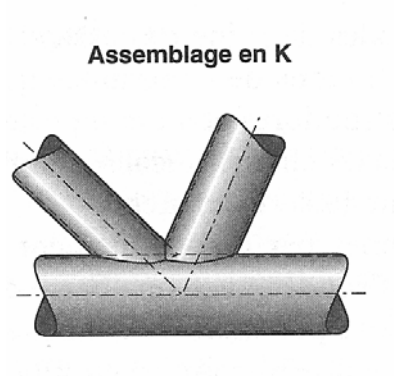
Assemblage par double couvre joint
Figure 8-7

En effet, dans le 1^{er} cas, la dissymétrie crée un moment de flexion parasite et l'assemblage se déforme :



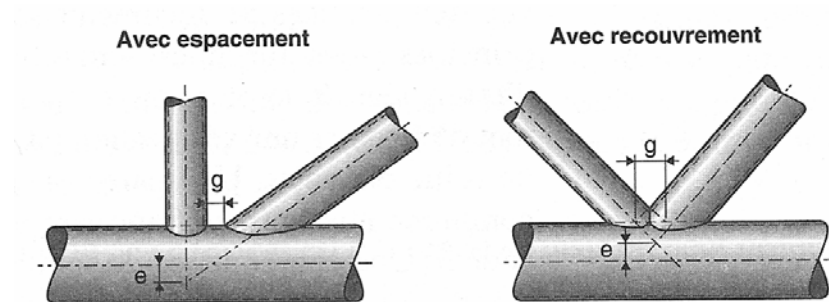
Déformation d'un assemblage par recouvrement simple
Figure 8-8

Il faut s'assurer que les axes neutres des barres soient concourants aux nœuds des treillis dans les systèmes réticulés.



Les axes neutres des barres sont concourants
Tableau 8-9

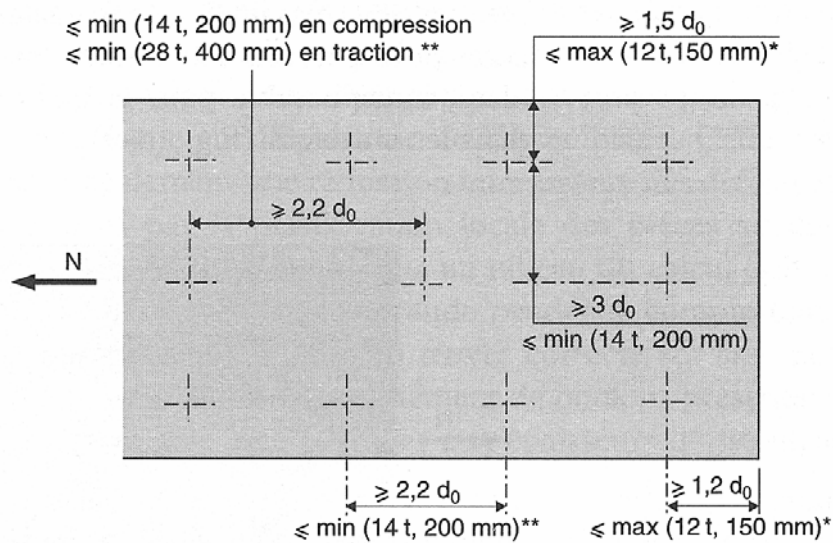
Par ailleurs, il faut prendre en compte les majorations des contraintes engendrées par les moments secondaires dans les assemblages excentrés.



Assemblages de tubes avec excentricité

Figure 8-10

Des valeurs minimales et maximales des pinces longitudinales et transversales et de l'entraxe des boulons sont également prescrites par l'Eurocode 3



*Valeurs minimales et maximales des pinces
et de l'entraxe des boulons*

Figure 8-11

LES ASSEMBLAGES SOUDES

1 INTRODUCTION

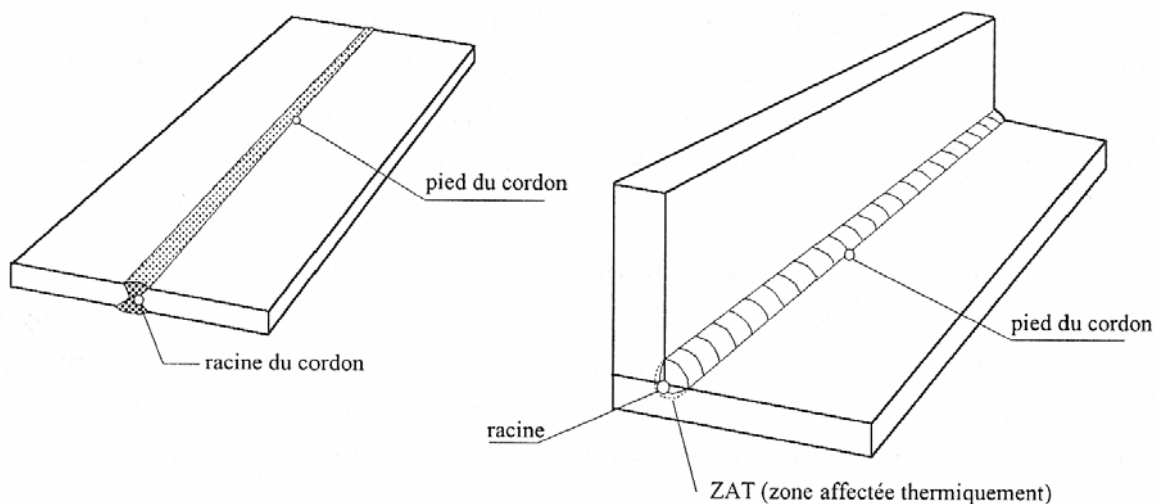
Le soudage est un procédé qui permet d'assembler des pièces par liaison intime de la matière, obtenue par fusion ou plastification.

Le soudage présente, par rapport au boulonnage, plusieurs avantages :

- il assure la continuité de matière, et, de ce fait, garantit une bonne transmission des sollicitations ;
- il dispense de pièces secondaires (goussets, attaches, etc...) ;
- il est de moindre encombrement et plus esthétique que le boulonnage.

En revanche, il présente divers inconvénients :

- le métal de base doit être soudable ;
- le contrôle des soudures est nécessaire et onéreux ;
- le contrôle des soudeurs est aléatoire ;
- le soudage exige une main-d'œuvre qualifiée et un matériel spécifique.



Liaison de deux pièces par soudage

Figure 9-1

2 PROCEDES DE SOUDAGE

On peut citer :

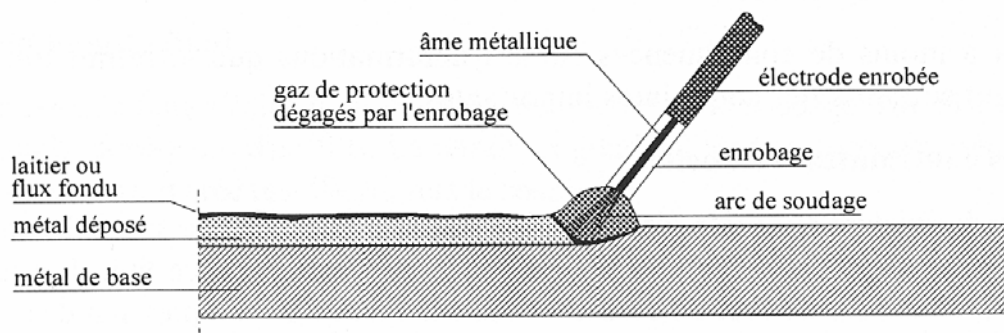
- procédé par pression ;
- procédé par résistance électrique ;
- procédé par friction ;
- procédé chimique au chalumeau oxyacétylénique ;
- procédé au LAZER ;
- procédé par bombardement électronique ;
- procédé à l'arc au PLAZMA ;
- procédé à l'arc électrique.

2.1 Procédé chimique au chalumeau oxyacétylénique

Il utilise la combustion d'oxygène et d'acétylène, à une température d'environ 3000°C, le métal d'apport étant fourni par des baguettes d'acier fusibles, ce procédé est peu utilisé en construction métallique, car il est plus onéreux que les procédés à l'arc pour des sections d'acier épaisses.

2.2 Procédés à l'arc électrique

Ce sont les procédés les plus couramment utilisés en construction métallique.

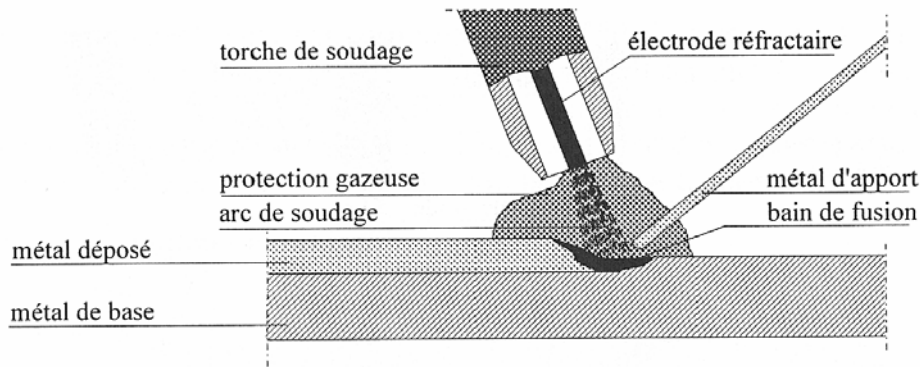


Principe de soudage à l'arc

Figure 9-2

2.2.1 Procédés à électrode non fusible (TIG)

L'arc est produit entre une électrode de tungstène non fusible et les pièces, sous jet d'ARGON, qui est un gaz inerte. Le métal d'apport est obtenu par fusion d'une baguette indépendante. En atelier, ce procédé est semi-automatique ou automatique.



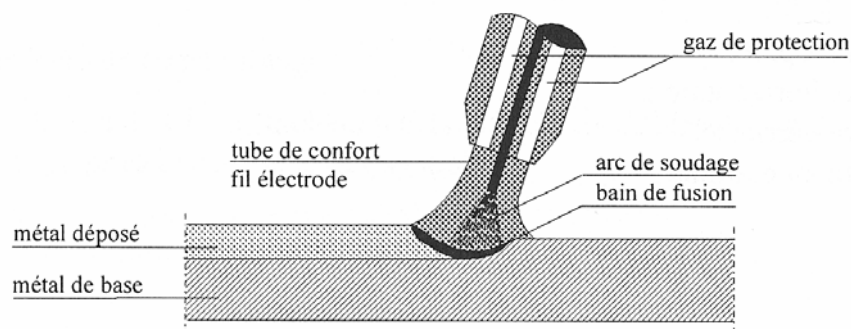
Soudage sous flux gazeux – Procédé TIG

Figure 9-3

2.2.2 Procédés à électrodes fusibles

Un arc électrique est créé entre une électrode fusible (cathode) et les pièces à souder (anode), grâce à un générateur de courant, alternatif ou continu, de faible voltage, mais de fort ampérage (de 50 à 600 ampères).

Les particules fondues de la cathode sont projetées sur l'anode, au travers de l'arc, et se déposent. Il suffit alors de déplacer la cathode le long du joint d'assemblage pour constituer un cordon continu de soudure.



Soudage sous flux gazeux

Figure 9-4

La protection vis-à-vis de l'atmosphère ambiante est obtenue par un gaz insufflé dans une buse concentrique à l'électrode. Si le gaz est inerte, il s'agit du procédé MIG. Pour un gaz actif, c'est le procédé MAG.

3 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

3.1 Définitions de la gorge des cordons d'angle

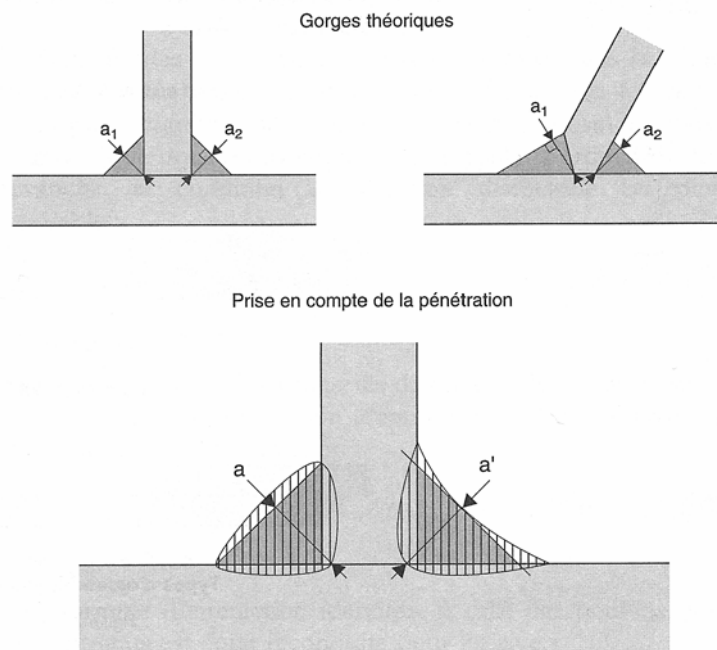


Figure 9-5

3.2 Soudures bout à bout



Figure 9-6

3.3 Soudures d'angle

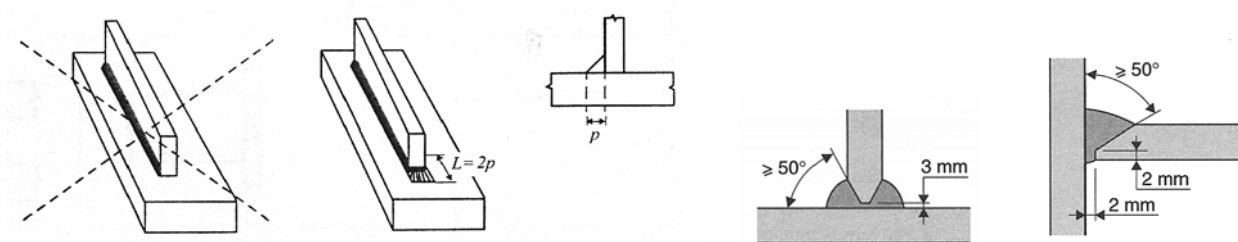
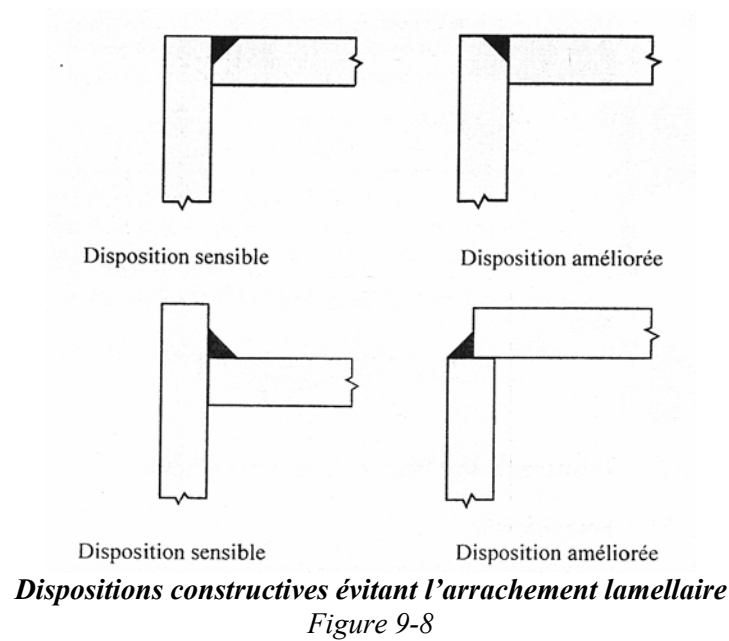


Figure 9-7

Il convient de ne pas arrêter les soudures d'angle aux extrémités des éléments assemblés. Elles doivent contourner les coins des assemblages sans interruption, en gardant leur dimension sur une longueur égale à deux fois le pied du cordon, à tous les endroits où ce retour est possible dans un même plan.



3.4 Autres types de liaisons soudées

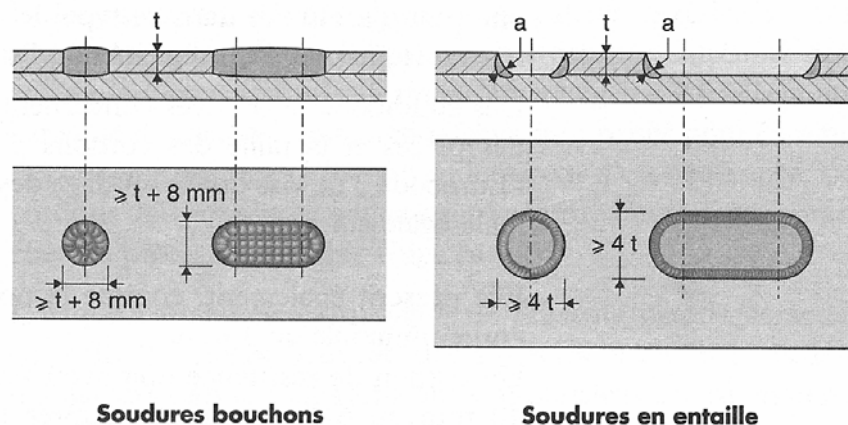


Figure 9-9

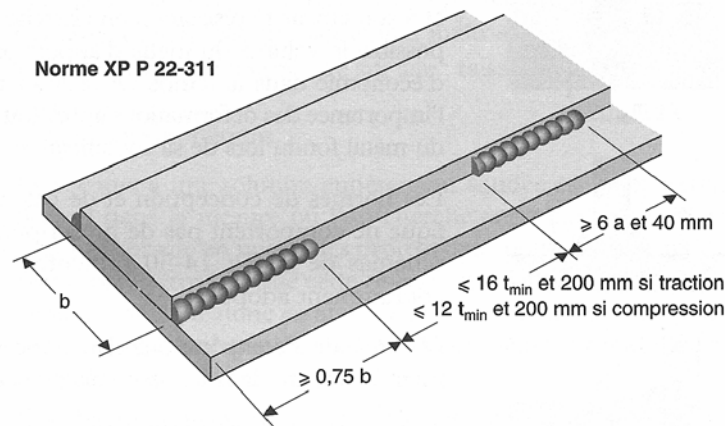
4 PRECAUTIONS CONSTRUCTIVES

Le soudage de l'acier exige des températures élevées qui vont provoquer une dilatation locale des pièces. Lors du refroidissement de la zone du cordon de soudure, le retrait va :

1. soit provoquer des déformations dans les pièces, si ces dernières sont librement dilatables.
2. soit générer des contraintes internes dans les pièces, si ces dernières sont bridées.

Dans le premier cas, pour remédier aux déformations, il est possible :

- soit de donner aux pièces des déformations initiales inverses, qui compenseront les déformations en retrait ;
- soit de redresser les pièces à froid, sous presse ;
- soit d'effectuer les cordons par tronçons discontinus et espacés dans le temps ;



Cordons discontinus

Figure 9-10

- soit de préchauffer les pièces pour éviter un refroidissement brusque.

Dans le second cas, pour limiter les contraintes internes, il est possible :

- soit d'assouplir le bridage, ce qui autorisera de faibles déformations, acceptable ;
- soit de post chauffer les pièces.

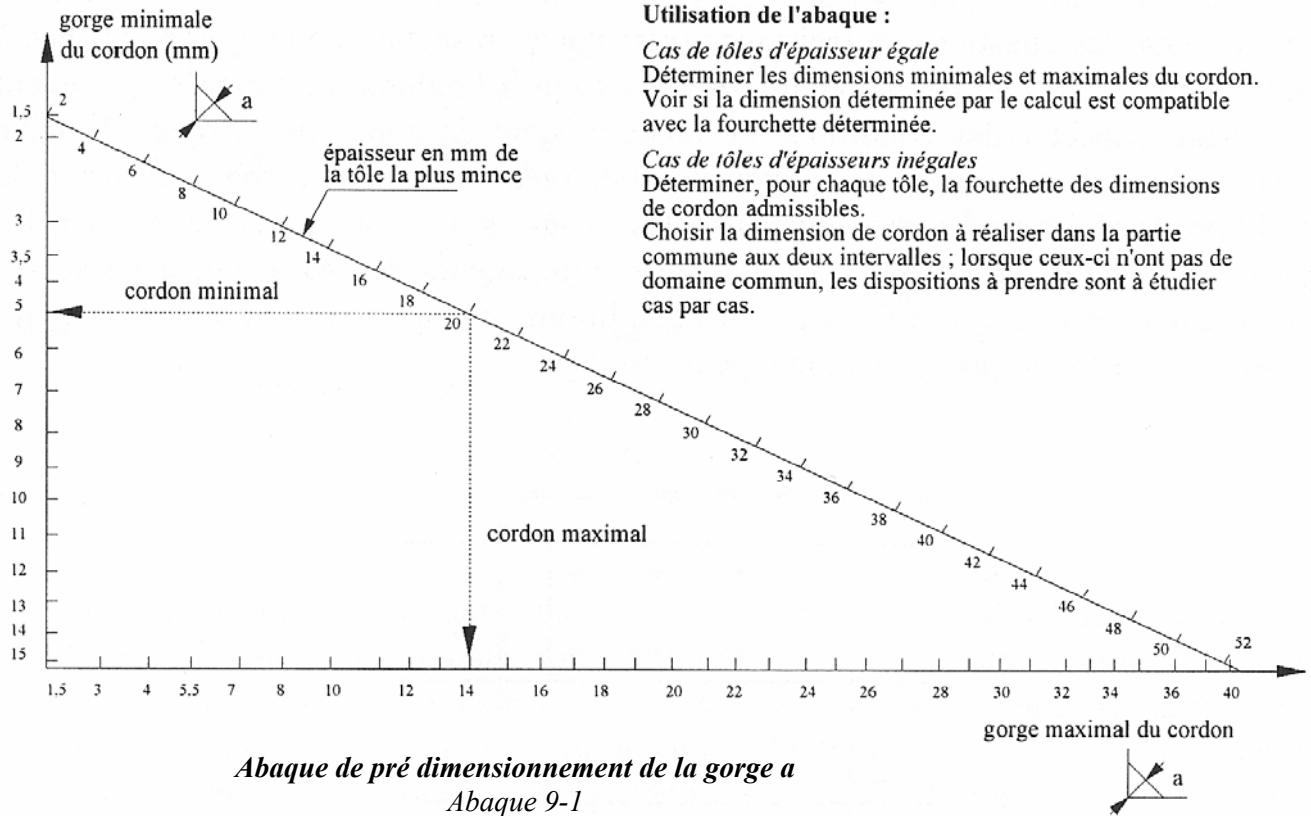
Quelques autres précautions élémentaires doivent être prises :

- éviter l'assemblage de pièces de trop grande différence d'épaisseur, car il y a risque de déformation de la pièce la plus mince et risque de fissuration du cordon de soudure au refroidissement.
- Eviter les assemblages par soudure pour des pièces d'épaisseur supérieure à 30mm.
- Réaliser des cordons de diamètre supérieur à 4 mm et de longueur supérieure à 50mm.
- Veiller à une bonne corrélation entre l'épaisseur du cordon et l'épaisseur de la plus faible des pièces à assembler.

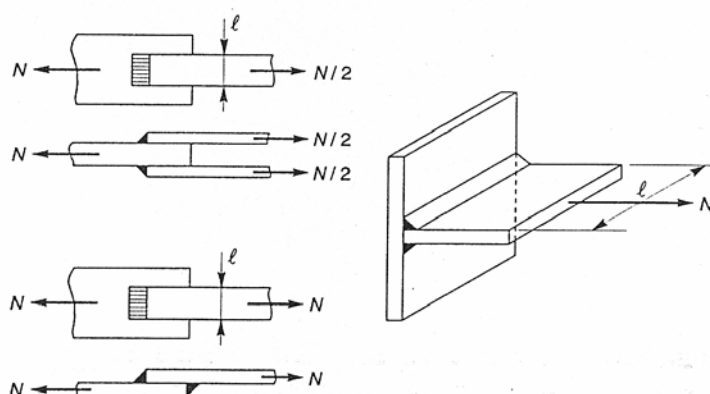
5 CALCUL DES CORDONS DE SOUDURE

Les soudures bout à bout ne se calculent pas.

5.1 Pré dimensionnement de la gorge



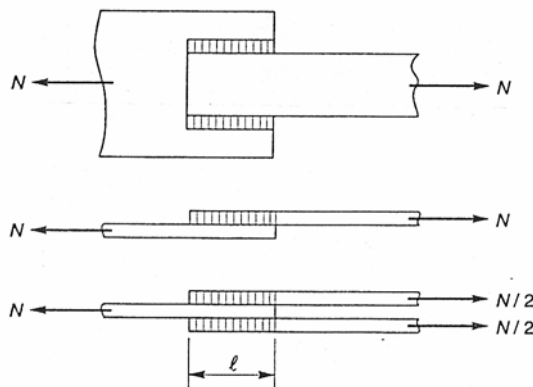
5.2 Cordons frontaux



$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N \sqrt{2}}{f_u}$$

Assemblage par cordons frontaux
Figure 9-11

5.3 Cordons latéraux

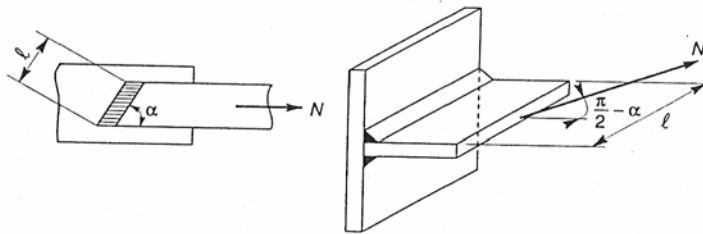


$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N \sqrt{3}}{f_u}$$

Assemblage par cordons latéraux

Figure 9-12

5.4 Cordons obliques



$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N \sqrt{3 - \sin^2 \alpha}}{f_u}$$

Assemblage par cordons obliques

Figure 9-13

NOTATIONS :

- a épaisseur utile ou gorge, distance minimale de la racine à la surface du cordon ;
- l longueur utile du cordon ;
- N effort pondéré appliqué à chaque cordon, supposé centré au milieu de la longueur du cordon ;

Les coefficients β_w et γ_{Mw} variables selon la nuance d'acier :

Nuances d'acier		γ_{Mw}	β_w	$\beta_w \cdot \gamma_{Mw}$
f_y	f_u			
235 MPa	360 MPa	1.25	0.80	1.00
275 MPa	430 MPa	1.30	0.85	1.10
355 MPa	510 MPa	1.35	0.90	1.20

Tableau 9-1

PROTECTION ET ENTRETIEN

1 INTRODUCTION

L'acier tend à se dégrader superficiellement lorsqu'il est soumis à des milieux corrosifs : atmosphères humides, condensation, eaux et sols. La rouille est donc devenue la terreur des maîtres d'oeuvre... et des maîtres d'ouvrage. Pourtant, les précautions prises à la conception et à la réalisation des éléments en acier permettent de la prévenir totalement... lorsque le risque existe! Dans la plupart des cas, il faut le protéger ou utiliser une nuance assurant son autoprotection. L'acier entre dans les constructions métalliques sous des formes différentes qui ne seront pas protégées de la même façon (profilés laminés à chaud pour les ossatures, tôles formées à froid pour les éléments plans: façades, couvertures, planchers, équipements). De plus, tous ces produits ne seront pas soumis aux mêmes agressions et les taux de corrosion ne sont pas identiques dans toutes les atmosphères.

Pour l'acier, la forme de corrosion la plus courante est la corrosion uniforme, ou généralisée, qui se traduit par la formation de rouille. Ce produit, composé d'oxydes plus ou moins hydratés, ne se forme qu'en présence d'oxygène et d'eau à température ordinaire. Cette corrosion est dite aqueuse et c'est la forme la plus fréquemment rencontrée en construction métallique.

D'autres formes de corrosion peuvent se manifester dans des conditions particulières : corrosion localisée, corrosion sous contrainte, corrosion à haute température...

2 PREPARATION DE LA SURFACE DE L'ACIER

La bonne préparation de la surface de l'acier est d'une importance capitale pour obtenir un système de protection efficace.

Les deux facteurs principaux dans le traitement préalable des surfaces sont la propreté et la rugosité.

2.1 Propreté de surface

Le profilé, ou la tôle, d'acier sortant du laminoir est généralement recouvert d'une couche de calamine bleu foncé. Pendant le stockage à l'air libre, la calamine se transforme progressivement en rouille; celle-ci s'écaille peu à peu, découvrant l'acier sous-jacent. Certains procédés de laminage évitent la formation de calamine, tel le laminage thermomécanique des tôles.

Les différents procédés de protection contre la corrosion, sont :

- Galvanisation à chaud ;
- Zingage électrolytique ;
- Mise en peinture ;
- Métallisation par projection suivie de mise en peinture ;
- Galvanisation à chaud suivie de mise en peinture.

Il existe des spécifications techniques particulières pour les préparations de surface par grattage, piquage et brossage, jusqu'à élimination de la calamine et de la rouille. Ces opérations peuvent se faire au burin pneumatique, au pistolet à aiguilles pneumatique ou à la brosse métallique rotative, électrique ou pneumatique. Le degré de soin de décapage correspondant à ces techniques s'apprécie par référence à la norme française NF E 05-50 1 « Échantillons de comparaison viso-tactile ».

2.2 Rugosité de surface

Il faut éviter une rugosité excessive parce que la corrosion peut se former facilement sur les pics de l'acier avivé, là où la couche de peinture est mince (ou au moins plus mince) et ne constitue pas une protection suffisante. En général, il est souhaitable d'avoir des écarts de rugosité aussi faibles que permis par les conditions technico-économiques.

Des abrasifs fins nettoient plus vite et plus à fond que des abrasifs à gros grain, sauf s'il est nécessaire de briser une grosse couche de calamine, d'épaisses couches de rouille ou d'anciennes peintures. Dans les installations automatiques modernes à tôles et profilés, la calamine est enlevée au chalumeau et en chauffant avant sablage. Une rugosité (distance pic-vallée) de 30 à 50 μm est considérée comme normale, 60 μm représentant un maximum en des circonstances normales et 100 μm un maximum absolu pour des cas exceptionnels.

2.3 Procédés de préparation de surface :

On distingue :

- Le nettoyage par projection d'abrasifs ;
- Le nettoyage à la main ;
- Le nettoyage à la flamme (brûlage) ;
- Le décapage chimique.

Ces procédés peuvent s'appliquer différemment s'il s'agit de structures nouvelles, d'entretien ou de parties soudées.

2.3.1 Nettoyage par projection d'abrasifs

Le nettoyage par abrasif est le procédé de préparation de surface le plus répandu pour l'acier de construction. Ce prétraitement peut être fait sur des ensembles aussi bien que sur des profilés et tôles. Les trois procédés principaux sont les suivants :

- pneumatique: particulièrement utile autour des écrous, boulons et têtes de rivets, l'abrasif est véhiculé par air comprimé à la main ou automatiquement ;
- centrifuge: l'abrasif est projeté par une turbine, procédé toujours automatique ;
- humide: l'abrasif est transmis par jet d'eau sous pression (quelquefois on utilise un inhibiteur).

Il existe un grand nombre d'abrasifs. Le sable classique (souvent du quartz) est prohibé dans la plupart des pays européens en raison du danger de silicose. Les abrasifs les plus employés sont des particules d'acier sous forme de grenaille angulaire ou sphérique et le corindon (oxyde d'aluminium). Ils peuvent être récupérés. Les abrasifs non récupérables

sont les scories ou produits minéraux dans lesquels la silice n'est présente que sous une forme combinée et inoffensive.

Si l'acier est très rouillé, le grenaillage peut être assez long. Il n'est pas toujours possible d'obtenir économiquement des standards de première qualité; aussi est-il recommandé de sabler l'acier dès qu'on le peut après laminage. Une surface sablée ou grenaillée est extrêmement sensible à l'action des agents atmosphériques. Elle tend à s'oxyder rapidement. Il y a lieu de la protéger sans attendre (le délai s'étend de deux à six heures selon l'humidité de l'atmosphère ambiante) et de passer immédiatement à l'application d'une couche primaire.

2.3.2 Procédé manuel

On dispose pour cela d'un grand choix d'outils à main et mécaniques, par exemple : grattoirs, marteaux de piquage, brosses métalliques rotatives, disques et autres outils abrasifs.

Dans la plupart des cas, un dégraissage préalable est nécessaire. La qualité de préparation de la surface par procédé manuel est toujours inférieure à celle obtenue par sablage. C'est donc pour l'opérateur une grande responsabilité. Dans certains cas, le procédé utilisé pour la préparation de la surface détermine le choix de la peinture primaire.

2.3.3 Nettoyage à la flamme (brûlage)

Ce procédé d'élimination de calamine et de rouille peut être utilisé sur des tôles de plus de 5 mm d'épaisseur. Le plus souvent, on utilise un dispositif à balai qui envoie de courtes flammes chaudes à la surface de l'acier. La rapide élévation de la température provoquée par le mélange oxygène-acétylène ou oxygène-propane brise les impuretés de la surface. Le nettoyage n'est cependant pas complet. Pour obtenir une qualité élevée, il faut ensuite une opération de sablage, décapage chimique ou par abrasion.

2.3.4 Décapage chimique

C'est un autre procédé, effectué dans des installations industrielles, pour enlever calamine et rouille. Après le décapage, on effectue un rinçage très soigné à l'aide de solutions neutralisantes et à grande eau afin de neutraliser la formation de rouille. Il faut procéder ensuite à un séchage complet avant de peindre. Dans le décapage, les résultats dépendent plus de l'habileté de l'opérateur que dans le sablage. Le nettoyage chimique est le plus souvent utilisé avant galvanisation. Les produits utilisés sont nombreux: pâtes ou solutions à forte teneur en acide, mais aussi accélérateurs de décapage, ralentisseurs d'attaque, solvants, détergents, etc.

Les acides suivants sont habituellement utilisés :

Acide chlorhydrique (HCl) : employé froid après addition d'un inhibiteur afin d'éviter une attaque excessive. Grande réactivité à la surface. Faible concentration ($< 5\%$).

Acide sulfurique (H₂SO₄) : employé chauffé. Concentration un peu plus élevée que HCl (environ 10%).

Acide phosphorique (H₃PO₄) : plus coûteux que les deux premiers. Les traces d'acide restantes se transforment en phosphates de fer qui produisent une passivation de la surface de l'acier. Concentration pour décapage $\pm 15\%$ et pour passivation $\pm 2\%$, température 70 à $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. La fine couche de phosphate qui subsiste sur l'acier chaud forme un liant suffisant pour permettre l'application immédiate de peinture.

2.3.5 Nettoyage des soudures

Lorsque les pièces de charpentes sont préparées et pré peintes avant leur usinage, il faut veiller à masquer la zone des soudures (normalement une zone de 50 mm de large suffit). Les couches de peinture existantes peuvent être enlevées par sablage ou polissage. En nettoyant les soudures, il faut non seulement considérer la soudure elle-même, mais aussi les dépôts alcalins laissés à la surface par certains procédés de soudage et les projections ou les gouttes au voisinage des soudures.

Pour le sablage des soudures, il existe des buses spéciales: le sablage est alors effectué dans une zone étroite qui laisse intacte la surface voisine, souvent déjà recouverte d'une peinture primaire. De cette manière, les soudures peuvent être prétraitées avant peinture au même degré de préparation que le métal environnant.

Les pistolets à aiguilles sont des appareils mécaniques portatifs: ils contiennent un faisceau d'aiguilles en acier trempé qui peuvent se déplacer indépendamment les uns des autres. Ceci permet d'effectuer un bon nettoyage sur des cordons de soudure de forme irrégulière. Le degré de propreté n'est toutefois pas aussi bon que celui obtenu par grenailage.

Le meulage des soudures ne se fait que lorsque des raisons esthétiques l'exigent. La surface est alors entièrement propre et de bonne qualité.

3 REVETEMENT DES STRUCTURES PAR PEINTURE

L'emploi des peintures est le procédé le plus couramment utilisé pour protéger l'acier contre la corrosion. Comme beaucoup d'autres, la technique des peintures a fait de grands progrès. En conséquence, on obtient une durée de vie beaucoup plus longue avant la première période d'entretien.

3.1 Choix du type de peinture

Type	Caractéristiques
<i>Peintures alkydes et à l'huile</i>	
<i>Huiles siccatives ; Résines alkydes ; Résines alkydes modifiées ; Vernis phénoliques ; Esters époxydiques.</i>	<i>Elles conviennent à des atmosphères modérément agressives ; Elles ne résistent pas aux attaques chimiques directes ni à l'immersion dans l'eau ; Elles conservent leur brillant à l'air libre ;</i>

	<i>Elles conviennent à presque tous les modes d'application ;</i> <i>Elles peuvent être repeintes même après un service prolongé ;</i> <i>Elles sont peu coûteuses ;</i>
<i>Peintures à un constituant résistant aux produits chimiques</i>	
<i>Caractéristiques communes</i>	<i>Elles ont une excellente résistance à l'eau (y compris en immersion) ;</i> <i>Elles ont une bonne résistance aux acides inorganiques et aux alcalis ;</i> <i>Leur résistance à la température est de 65°C maximum.</i>
<i>Peintures vinyliques</i>	<i>Elles ont une bonne résistance aux produits chimiques ;</i> <i>Elles peuvent être repeintes sans difficulté.</i>
<i>Peintures au caoutchouc chloré</i>	<i>Les peintures à faible consistance :</i> <i>Elles présentent une assez bonne résistance aux agents chimiques et s'appliquent facilement ;</i> <i>Elles sont surtout utilisées en milieu moyennement agressif et en milieu marin. (entre autres comme peintures marines)</i>
	<i>Les peintures à forte consistance et résistance maximale aux agents chimiques :</i> <i>Elles sont utilisées dans les atmosphères chimiques agressives et en industrie chimique</i>
<i>Peintures bitumineuses</i>	<i>Elles s'appliquent surtout aux structures immergées et souterraines ;</i> <i>Elles ont le grand avantage d'être imperméables à l'eau ;</i> <i>Elles ne résistent pas l'huile ni aux faibles couches d'huile à la surface de l'eau.</i>
<i>Peintures à base de résines à base d'eau</i>	<i>Elles ont d'excellentes propriétés mécaniques</i>

<i>Peintures à base de polyuréthane séchant à l'humidité</i>	<i>Elles offrent la plupart des performances des peintures à base de polyuréthane à deux constituants.</i>
<i>Peintures à deux constituants résistant aux produits chimiques</i>	
<i>Peintures époxydiques</i>	<i>Elles ont une bonne adhérence ;</i> <i>Elles ont une bonne résistance à l'abrasion (usure par frottement) ;</i> <i>Elles ont une bonne résistance mécanique à une large gamme d'acides, alcalis, huiles et solvants ;</i> <i>Elles supportent une légère déformation ;</i> <i>Elles se ternissent (perdent leur éclat) sous l'effet d'un soleil ardent et ont tendance à poudrer au bout d'un certain temps.</i>
<i>Peintures à base de polyuréthane</i>	<i>Leur comportement mécanique et chimique est sensiblement le même que celui des résines époxydiques mais elles gardent leur brillant plus longtemps.</i>

Tableau 10-1

3.2 Système de peinture

Un système de peinture de l'acier de construction comprend :

- Une ou des couches primaires : constituer une base d'adhérence pour les couches ultérieures et inhiber le processus de corrosion.
- Une ou des couches intermédiaires : contribuer à l'épaisseur totale du revêtement.
- Une ou des couches de finition : résister à l'influence de l'atmosphère

Le système de peinture s'applique sur une surface préparée. Plus une peinture est de bonne qualité, plus la surface doit être préparée.

3.3 Modes d'application des peintures

Dans le cas de l'acier de construction l'application se fait : à la brosse ; au rouleau ; par pulvérisation pneumatique ; par pulvérisation sans air.

Le choix d'un mode d'application ne se fait pas seulement en fonction du résultat technique mais aussi du prix de revient. Celui-ci varie beaucoup d'une méthode à l'autre.

Un autre point important est la distinction entre couche primaire, intermédiaire ou de finition. Certaines peintures, par exemple les peintures à haute viscosité, ont une consistance élevée et exigent de ce fait des techniques particulières d'application.

3.3.1 Application à la brosse

Elle ne peut être faite qu'à la main et représente donc un travail long et coûteux. La peinture est au mieux appliquée sur une surface d'acier rugueuse, par exemple grenillée. Cette méthode convient donc pour l'application de la première couche primaire des peintures ordinaires.

L'application à la brosse se faisant lentement, l'opérateur a le temps de contrôler son propre travail et de retoucher immédiatement d'éventuelles imperfections. Un autre avantage de ce procédé est qu'il y a peu de perte de peinture.

3.3.2 Rouleau

Il est surtout utilisé sur des surfaces planes. La méthode est beaucoup plus rapide que la brosse et plus économique par unité de surface. La perte en peinture est plus grande en raison de l'écoulement. Le principal inconvénient par rapport à la brosse est la moins bonne adhérence sur le subjectile. Ce procédé est donc à éviter pour les couches primaires.

3.3.3 Pulvérisation pneumatique

C'est le mode d'application le plus employé et il est pratiquement universel. Néanmoins, il présente certains inconvénients lorsqu'il est appliqué aux charpentes métalliques. Pour pouvoir être projetée, la peinture doit avoir une teneur élevée en solvant ce qui donne de faibles épaisseurs (30-35 μm) par passe si l'on veut éviter des coulures.

3.3.4 Pulvérisation sans air

Dans ce procédé, la peinture est amenée au pistolet sous une pression élevée (jusqu'à 20 MPa ou 200 bars) et pulvérisée sans air dans le gicleur, à grande vitesse. Les particules de peinture sont projetées violemment à la surface de l'acier, ce qui produit un excellent contact. C'est donc une bonne méthode pour appliquer les couches primaires.

Elle convient aussi aux couches intermédiaires et de finition. Elle permet également d'appliquer une épaisseur considérable de peinture en une fois. Tous ces avantages réunis en font une méthode presque idéale pour l'acier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **JEAN MOREL** - Guide de calcul Structures Métalliques (CM66, Additif 80, Eurocode 3), Editions Eyrolles 2^{ème} tirage (1997).
- [2] **JEAN MOREL** - Calcul des Structures Métalliques selon l'Eurocode 3, Editions Eyrolles 3^{ème} tirage (1997).
- [3] **PIERRE MAITRE** – Formulaire de la construction métallique, Editions Le Moniteur (1997).
- [4] **CLAUDE CORBET** – Dessin de construction en ouvrage ouvrages chaudronnés et structures métalliques, Editions Casteilla (2000).
- [5] **PIERRE BOURRIER, JACQUES BROZZETTI** – Construction métallique et mixte Acier - Béton (selon les Eurocodes 3 et 4) Tome I et Tome II, Editions Eyrolles (1996).
- [6] **J.-M. DESTRAC, D. LE FAIVRE, Y. MALDENT, S. VILA** – Mémotech (génie civil), Editions Casteilla (1996).
- [7] **ALAIN NANTEL, TRAN MINH NGOL** – Dessin de structure d'acier, Editions Modulo Editeur.
- [8] **C.HAZARD, F. LELONG, B. QUINZAIN** – Mémotech (structures métalliques), Editions Casteilla (1997).

- [9] **ELDAR RAMAZANOV** – Pratique des constructions métalliques et mixtes, Editions Centre de publication universitaire (2000).
- [10] **JACQUES BROZZETTI, MANFRED A. HIRT, ROLF BEZ** – Construction métallique (exemples numériques adaptés aux Eurocodes), Editions Presses polytechniques et universitaires Romandes (1995).
- [11] **J. F. DROUET** – Manuels Drouet calcul des constructions métalliques Fascicule (A, B, C et D), Editions G. M. Perrin (1970).
- [12] **J. F. DROUET** – Manuels Drouet calcul des constructions métalliques Fascicule (E), Editions G. M. Perrin (1970).
- [13] **MANFRED A. HIRT, MICHEL CRISINEL** – Conception des charpentes métalliques, Editions Presses polytechniques et universitaires Romandes (2002).
- [14] **JACQUES BROZZETTI** – Eurocode 3 et document d'application nationale Calcul des structure en acier Partie 1-1 (Règles générales et règles pour les bâtiments), Editions Eyrolles (1996).
- [15] **MANFRED A. HIRT, MICHEL CRISINEL** – Charpentes métalliques Conception et dimensionnement des halles et bâtiments, Editions Presses polytechniques et universitaires Romandes (2002).
- [16] **PIERRE MAITRE** – Formulaire de la construction métallique A jour des Eurocodes 1 et 3, Editions Le Moniteur (2001).

ANNEXE I

FORMULAIRE DE CALCUL

EFFORT TRANCHANT (V) :

$$V \leq V_{pl} = \frac{f_y \cdot A_{vz}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

EFFORT NORMAL (N) :

$$N \leq N_{pl} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

FLEXION SIMPLE (M):

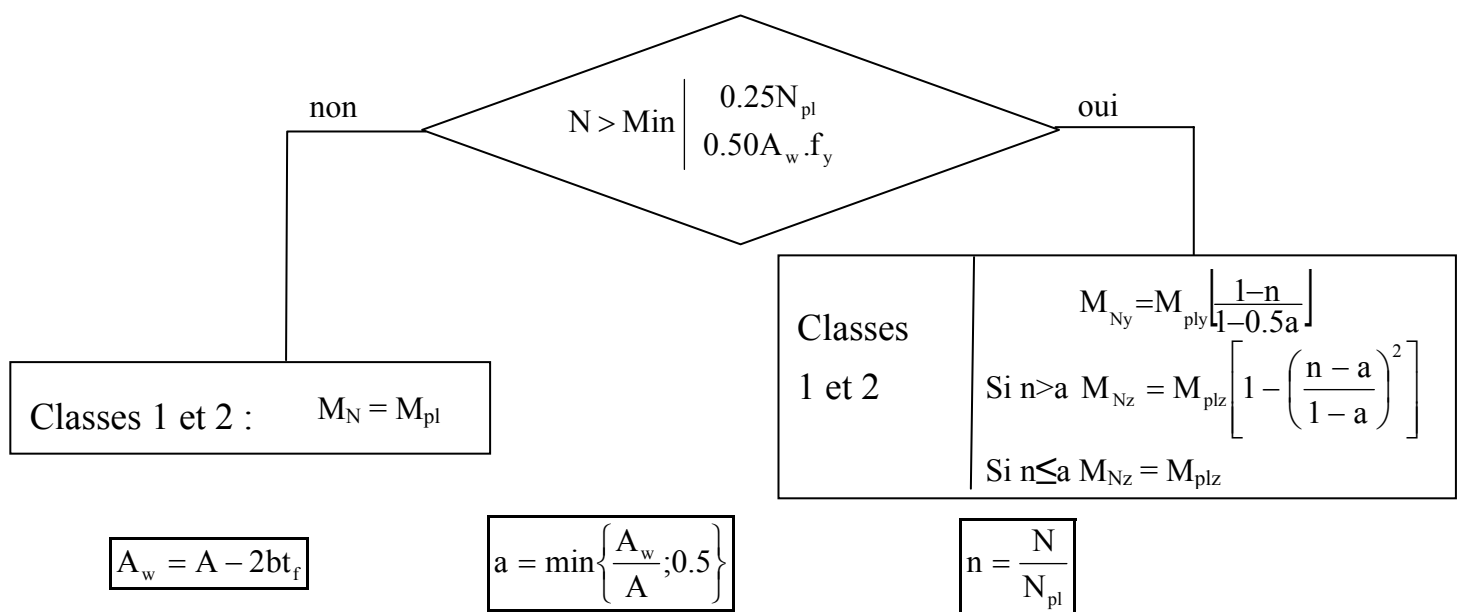
$$\text{Classe 1 et 2 : } M \leq M_R = M_{pl} = \frac{\omega_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

FLEXION ET EFFORT TRANCHANT (M + V) :

- Si $V < 0.5 V_{pl} \rightarrow$ résistance de calcul sous (M)
- Si $V \geq 0.5 V_{pl} \rightarrow M \leq M_v = \left[w_{pl} - \frac{\rho A_v^2}{4 t_w} \right] \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$ pour flexion suivant l'axe de forte inertie

FLEXION COMPOSEE SEULE (M + N) :

$$M \leq M_N$$



MOMENT DE FLEXION, EFFORT TRANCHANT ET EFFORT AXIAL (M + V + N)

- Si $V < 0.5 V_{pl} \rightarrow$ résistance de calcul sous (M) ou (M+N).
- Si $V \geq 0.5 V_{pl} \rightarrow M \leq \left\{ \begin{array}{l} \text{si M seul : } M_R = M_{pl}(f_{red}), \text{ si M + N : } M_R = M_N(f_{red}) \end{array} \right\}$

$$\text{Avec : } f_{red} = (1 - \rho) \cdot f_y \quad \text{et} \quad \rho = \left(\frac{2V}{V_{pl}} - 1 \right)^2$$

FLAMBEMENT :

L'élancement réduit

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_{cr}} = \frac{l_k}{i \lambda_{cr}}$$

L'élancement critique

$$\lambda_{cr} = \Pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

E : module d'Young

La résistance de calcul au flambement d'un élément comprimé :

$$N = \chi \cdot \beta_A \cdot A f_y / \gamma_{M1}$$

ASSEMBLAGE :

BOULONS ORDINAIRES :

Résistance d'un boulon au cisaillement par plan de cisaillement :

- pour les classes de qualité 4.6, 5.6 et 8.8 :

$$F_v = 0.6 f_{ub} \frac{A_b}{\gamma_{Mb}}$$

- pour les classes de qualité 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 :

$$F_v = 0.5 f_{ub} \frac{A_b}{\gamma_{Mb}}$$

Résistance d'un boulon à la traction :

$$F_T = 0.9 f_{ub} \frac{A_s}{\gamma_{Mb}}$$

- $A_b = A$: aire de la section brute du boulon, si le plan de cisaillement passe par la partie non filetée du boulon ;
 $= A_s$: aire de la section résistante en traction du boulon, si le plan de cisaillement passe par la partie filetée du boulon.
 $\gamma_{Mb} = 1.25$ pour le cisaillement
 $\gamma_{Mb} = 1.50$ pour la traction

Résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées :

$$F_B = 2.5 f_u d_0 \frac{t}{\gamma_{Mb}}$$

Assemblages sollicités simultanément au cisaillement et à la traction :

Les boulons soumis à des efforts combinés de cisaillement V et de traction T, doivent satisfaire aux conditions suivantes :

$$\frac{V}{F_V} + \frac{T}{1.4F_T} \leq 1$$

BOULONS PRECONTRAINTS :

Assemblage résistant au glissement :

La résistance au glissement F_s d'un boulon HR précontraint vaut :

$$F_s = k_s m \mu F_p / \gamma_{MS}$$

Avec :

$$F_p = 0.7 f_{ub} A_s$$

F_p est la force de précontrainte ;

μ est le coefficient de frottement des pièces,

m est le nombre d'interfaces de frottement,

k_s est un coefficient fonction de la dimension des trous de perçage.

SOUDURES :

Cordons frontaux :

$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N\sqrt{2}}{f_u}$$

Cordons latéraux :

$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N\sqrt{3}}{f_u}$$

Cordons obliques :

$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N\sqrt{3 - \sin^2 \alpha}}{f_u}$$

a épaisseur utile ou gorge, distance minimale de la racine à la surface du cordon ;

l longueur utile du cordon ;

N effort pondéré appliqué à chaque cordon, supposé centré au milieu de la longueur du cordon.

Les coefficients β_w et γ_{Mw} sont variables selon la nuance d'acier.

ANNEXE II

Français\Anglais\Arabe

A

Acier	Steel		
Acier à haute résistance	Steel (high strength)		
Acier doux	Steel (mild)		
Acier écroui	Steel (cold worked)		
Acier inoxydable	Steel (stainless)		
Acier laminé	Steel (rolled)		
Acier soudable	Steel (weldable)		
Acier trempé	Steel (tempered)		
Adhérence	Bond		
Adjacent	Adjacent		
Aération	Aeration		
Aile du mur	Wing of wall	)	)
Aile inférieure	Lower flange		
Aile saillante	Projecting flange		
Aile supérieure	Flange (top)		
Aile (de cornière)	Leg		
Aile (de poutrelle)	Flange		
Aire de la section	Area (cross-sectional)		
Aire de préfabrication	Yard (precasting)		
Ajuster	Adapt (to)		
Allège	Apron, breast wall		
Alliage	Alloy		
Alliage léger	Alloy (light metal)	)	)
Allongement	Elongation		
Ame (d'un profilé)	Web		
Ame d'une poutre composée	Web plate		
Ame pleine	Web (solid)		
Amiante ciment	Asbestos cement		
Amorce d'entretoise	Diaphragm stub		
Ancrage	Anchorage		
Ancrage d'extrémité	Anchorage (end)		

Ancrage de pannes	Anchorage (purlin)
Appel d'offre	Invitation to tender
Appel d'offre public	Call for tenders (open)
Appel d'offre restreint	Call for tenders (restricted)
Aplomb	Vertical
Approbation des plans	Approval of drawings
Appui à glissement	Bearing (sliding)
Appui à rotule	Bearing (rocker)
Appui de fenêtre	Sill (window)
Appui de panne de faîte	support of ridge purlin
Appui élastique	bearing (elastic)
Appui encastré	bearing (fixed), (built-in)
Appui intermédiaire	bearing (intermediate)
Appui simple	bearing (simple)
Arbalétrier	ridgebeam (rafter principal)
Arbre	shaft
Arc articulé	arch (hinged)
Architecte	architect
Arête chanfreinée	angle (chamfred of bevelled)
Arêtier (toît)	hip (roof)
Article	item
Articulation	hinge
Ascenseur	lift
Assemblage	joint
Assemblage à l'atelier	assembly (shop)
Assemblage par boulons	connection (bolted)
Assemblage rivé	connection (rivet)
Assemblage soudé	connection (welded)
Assemblage (liaison)	connection
Assemblage (opération)	assembling
Atelier	workshop
Atelier de construction métallique	structural steelwork workshop
Atelier de montage	assembling shop
Auvent	canopy, porch
Aval	downstream
Avant métré	preliminary estimation of quantities

Avant projet	preliminary design
Axe	axis

B

Baguette à souder	welding rod
Baisse de pression	pressure drop
Barque de chantier	hut
Bardage	cladding
Bardage en planches	cladding (sheet pile)
Barre	bar
Barre comprimée	strut
Barre de treillis	truss member
Barre tendue	stay
Base	base
Bâti	frame
Bâtiment	building
Bâtiment industriel	building (industrial)
Bordereau des travaux	schedule of works
Boulon	bolt
Boulon à haute résistance	bolt (high strength)
Boulon à tête hexagonale	bolt (hexagon head)
Boulon d'ancrage	anchor bolt
Boulon fileté	bolt (screw)
Bracon	raker
Bras de levier	lever arm
Brevet	patent
Brique	brick
Brique creuse	brick (cavity, hollow)
Brique de parement	brick (facing)
Brique pleine	brick (solid)
Brique réfractaire	brick (fire-clay)
Brosse métallique	wire brush
Brosser	scrub (to)
Broyage	crushing
Brut	rough
Bureau d'étude	consulting engineer

))

Buton	stay
-------	------

C

Cage d'escalier	stair enclosure
Cahier des charges	specification
Calcul	calculation
Calcul de structure	analysis of structure
Camion	truck
Caractéristique	characteristic
Carbone	carbon
Carrelage	tile paving
Cas de charge	loading case
Ceder (casser)	yield (to)
Centre de gravité	centroid
Chalumeau soudeur	welding torch
Chamfrein	bevel
Chantier	site
Chapeau	cap
Charge	loading case
Charge admissible	permissible load
Charge concentrée	point load
Charge critique d'Euler	load (Euler buckling)
Charge d'exploitation	load (operating)
Charge de rupture	load (failure)
Charge de service	load (working, service)
Charge de vent	load (wind)
Charge mobile	load (moving)
Charge permanente	load (dead)
Charge répartie	uniformly distributed load
Charge statique	load (static)
Charge totale	load (total)
Charpente	frame
Charpente de bâtiment	structure (building)
Charpente métallique	structural (steel)
Chef d'équipe	ganger
Chef de chantier	fore man

Chemin de roulement	roller track, runway		
Cheminée	chimney		
Chéneau	eaves gutter		
Chevetre	trimmer		
Chevron	rafter		
Chiffre	digit		
Chiffre d'affaire	total cash turnover		
Choix du site	site selection		
Chute	fall		
Cinématique	kinematic		
Cisaillement	shear		
Classement	sorting		
Classification	classification		
Classique	conventional		
Climatisation	air conditioning		
Cloison	wall (partition)		
Coefficient	factor		
Coefficient de sécurité	factor of safety		
Coffrage métallique	formwork (steel)		
Coffrage perdu	formwork (sacrificial)		
Combles	roof space		
Compression simple	unconfined compression		
Comprimer	compress (to)		
Compte rendu	report		
Condition de sécurité	safety requirement		
Conduit d'aération	ventilation duct		
Contrainte de rupture	stress at failure		
Contrainte de traction	stress (tensile)		
Contrainte limite	stress (ultimate)		
Contre flèche	camber		
Contreventement	bracing (wind)	)	)
Contrôle des déformations	control (strain)		
Convention de signe	convention (sign)		
Cordon de soudure	welding torch		
Cornière	angle		
Cornière à ailes égales	angle (equal leg)		

Cornière à ailes inégales	angle (unequal leg)
Corps creux	hollow concrete block
Couche de protection	coat (protection)
Couche de rouille	layer (rust)
Coupe transversale	section (transversal)
Coupole	dome
Couverture	sheath, roofing
Couverture industrielle	space frame
Couvre joint	cover strip

D

Dalle	slab
Decoupage au chalumeau	cutting (flame)
Defaut de laminage	defect (rolling)
Déformer de manière plastique	yield (to)
Déformation à la rupture	strain at failure
Déformé au-delà de la limite élastique	overstrained
Dépouillement des offres	analysis of tenders
Descente eaux pluviales	down pipe rain water
Dessin d'exécution	drawing (work shop)
Destruction par rupture	failure by rupture
Diagramme de plasticité	chart (plasticity)
Dimensionnement	proportioning
Dispositif de sécurité	device (safety)
Dossier d'appel d'offres	tender documents
Dureté	toughness

E

Eaux pluviales	rainwater
Ecartement	spacing
Echantignole	cleat
Ecrasé	crushed
Ecrou	nut
Ecrouissage	work hardening
Elancement	slenderness
Empannon	rafter (jack)

:

Encastré aux extrémités	restrained at both ends
Entrait	ceiling joist
Entrepreneur	contractor
Entreprise	contracting firm
Entretien	maintenance
Entretoise (métallique)	cross girder
Epaisseur	thickness
Equerre	square
Equilibre	equilibrium
Essai de flambement	test (buckling)
Etage	floor, storey
Etain	tin
Etalonnage	calibration
Etanchéité	tightness
Etat limite ultime	ultimate limit state (uls)

F

Faîtage	ridge
Faux plafond	false ceiling
Ferme	truss))
Flambement	buckling
Flamber	nuckle (to)
Fleche (déformation)	deflection
Flexion composée	flexion (compound)
Flexion simple	flexion (simple)
Fondation	foundation, footing
Fonte	cast iron
Fournisseur	supplier

G

Gabarit	template
Gaine	duct
Galvanisé à chaud	galvanized (hot dif)
Gants de travail	gloves
Gargouille	gargoyle
Gousset	gusset plate

Gouttière	gutter
Grue	crane

H

Habitation	dwelling
Hangar	hangar
Hauteur	height
Hyperstatique	statically indeterminate

I

Immeuble de bureaux	office block
Immeuble d'habitation	block of multi-storey flats
Imperméable	water tight
Implantation	lay out
Impuretés	skimmed off
Inégalité	unevenness
Inertie	inertia
Inférieur	lower
Intérieur	inside
Isolation thermique	insulation (thermal)
Isostatique	statically determinate

J

Justification	supporting calculations
---------------	-------------------------

L

Laboratoire	laboratory
Laminier	mill (rolling)
Lanterneau	skylight
Large	wide
Largeur	width
Liaison	bond))
Lierne	fender walling
Lintau	lintel
Lisse d'appui	sub still
Longrine	ground beam

Longueur	length
Longueur de flambement	buckling length

M

Main d'œuvre	labour	
Main d'œuvre qualifiée	labour (skilled)	
Maitre d'oeuvre	architect or main consulting engineer	
Maitre d'ouvrage	client	
Manœuvre	labourer	
Masque de soudeur	welding mask	
Massif d'ancrage	anchorage block	
Matériau de construction	material (building)	
Matière première	material (raw)	
Membrane	chord	
Module d'young	Young's modulud	" "
Moment d'encastrement	moment (restraint)	
Moment d'inertie	moment of inertia	
Moment de flexion déviée	moment (biaxial)	
Moment de torsion	moment (twisting)	
Moment en travée	moment (span)	
Moment fléchissant	moment (bending)	
Moment statique	moment (statical)	
Moment sur appuis	moment (support)	
Montage	erection	
Montant	jamb, upright	))
Mouton	hammer (pile)	
Moyen de protection contre rouille	rust protective agent	
Mur	wall	

N

Naissance (d'un arc)	springing
Niveleuse	grader
Normes	standard
Note de calcul	calculations
Noe (toit)	valley
Noyau	core

Nuance d'acier	steel grade
----------------	-------------

O

Ossature métallique	frame (steel)
---------------------	---------------

P

Panne faîtière	ridge board
----------------	-------------

Panne (poutre)	purlin
----------------	--------

Panneau	panel
---------	-------

Paroi	wall, skin
-------	------------

Peinture anti rouille	paint (rust protective)
-----------------------	-------------------------

Pente	slope
-------	-------

Percer	drill (to)
--------	------------

Pignon	gable
--------	-------

Plafond suspendu	ceiling
------------------	---------

Plaque	panel
--------	-------

Plat	flat
------	------

Platine (plaque de métal)	plate (steel)
---------------------------	---------------

Poinçonnement	punching
---------------	----------

Pont rail	bridge (railway)
-----------	------------------

Portée	span
--------	------

Portique	portal frame
----------	--------------

Poste de soudage	welding set
------------------	-------------

Poteau	column
--------	--------

Poteau métallique do portique	frame stanchion
-------------------------------	-----------------

Poutre (métal)	girder
----------------	--------

Poutre à âme pleine	girder (solid web)
---------------------	--------------------

Poutre à treillis	girder (lattice)
-------------------	------------------

Précontrainte	prestressing
---------------	--------------

Profilé	steel (section)
---------	-----------------

Profilé en couverture	coping (profiled)
-----------------------	-------------------

Pylône	mast, pylon
--------	-------------

R

Raidisseur	stiffener
------------	-----------

Rayon de giration	radius of gyration
-------------------	--------------------

Réaction d'appui	reaction at support		
Regard	manhole		
Résistance à la compression	unconfined compressive strength		
Résistance à la rupture (cisaillement)	shear strength	)	)
Résistance à la traction	strength (tensile)		
Résistance au cisaillement	strength		
Résistance au flambement	strength (buckling)		
Rez-de-chaussée	ground floor		
Rotule plastique	hinge (plastic)		
Rouille	rust		
Rugosité	roughness		

S

Sécurité	safety		
Solive	joist	)	)
Sollicitation	load effect		
Soudage	welding		
Soudage à l'arc	welding (arc)		
Soudage autogène	welding (oxy-acetlene)		
Soudage bout à bout	welding (butt)		
Soudage d'angle	welding (fillet)		
Soudage discontinu	welding (intermittent)		
Soudage électrique	welding (electric)		
Soudage par points	welding (spot)		
Soudure	weld		
Soulèvement	heaving		
Soumission	tender		
Sous-sol (bâtiment)	basement		
Sous-traitant	sub contractor		
Stabilité	stability		
Stabilité au renversement	safety against overturning		

T

Toiture	roof		
Toiture à une seule pente	roof (single pitch)		
Toiture à quatre pentes	roof (hipped)		

Toiture en appentis	roof (lean to)
Toiture terrasse	spandrel
Tôle	plate
Tôle d'acier	sheet (steel)
Tôle ondulée	sheet metal (corrugated, pressed)
Travée	span
Traverse	joist, sleeper
Treillis	truss
Treillis soudé	welded wire fabric
Trépan	bit

V

Voilement	buckling		
Voûte	vault		
Vue de côté	side elevation		
Vue de dessus	view	)	)
Vue de face	view (front)		
Vue éclatée	view (exploded)	)	)
Vue en coupe	view (sectional)		
Vue en plan	view (plan)		
Vue latérale	view (side)		