

ANNEXES - GÉNÉRALITÉS

(Version du 12 octobre 2014 (9h37))

Résumé (Contraintes - allongements)					
	Traction	Torsion	Flexion	Cisaillement	Cisail. Technolo.
Contraintes	$\sigma_{tr} = \frac{N}{A}$	$\tau_{to} = \frac{M_t}{I_0/r}$ ou $\frac{M_t}{W_t}$	$\sigma_{fl} = \frac{M_f}{I/v}$	$\tau_{cis\ max} = k \tau$	$\tau_{cis\ tech} = \frac{T}{A}$
Contraintes admissible pour matériaux :					
Fragiles	$\sigma_{tr} \leq \frac{R_m}{S}$	$\tau_{to} \leq \frac{R_m}{S}$	$\sigma_{fl} \leq \frac{R_m}{S}$	$\tau_{cis\ max} \leq \frac{R_m}{S}$	$\tau_{cis\ tech} \leq \frac{R_m}{S}$
Ductiles	$\sigma_{tr} \leq \frac{R_e}{S}$	$\tau_{to} \leq 0.58 \frac{R_e}{S}$	$\sigma_{fl} \leq \frac{R_e}{S}$	$\tau_{cis\ max} \leq 0.58 \frac{R_e}{S}$	$\tau_{cis\ tech} \leq 0.8 \frac{R_e}{S}$
Allongement (Déformations)	$\Delta l = \frac{N l}{E A}$	$\varphi = \frac{M_t l}{G I_0}$	$f = \frac{1}{C} \frac{M_f l^2}{E I}$		
	$\varepsilon = \frac{N}{E A}$	$\theta = \frac{M_t}{G I_0}$	$\frac{1}{\rho} = \frac{M_f}{E I}$		
Loi de Hooke	$\sigma = \varepsilon E$	$\tau = \gamma G$	$\sigma = \varepsilon E$	$\tau = \gamma G$	
Contraintes - Allongements dus à la température :					
Contrainte	$\sigma_{T^o} = -\alpha \Delta T E$				
Allongement	$\Delta l_{T^o} = \alpha l \Delta T$				

Tableau récapitulatif : contraintes - déformations

ANNEXES - CHAPITRE 1. INTRODUCTION & VECTEURS

<i>Alphabet grec</i>			
<i>Lettres romaines</i>	<i>Lettres grecques</i>		
	Majuscules	Minuscules	Appellation
a	A	α	alpha
b	B	β	bêta
g	Γ	γ	gamma
d	Δ	δ	delta
e	E	ε	epsilon
z	Z	ζ	dzêta
ê	H	η	êta
th	Θ	θ	thêta
i	I	ι	iota
k, c	K	κ	kappa
l	Λ	λ	lambda
m	M	μ	mu
n	N	ν	nu
x	Ξ	ξ	ksi
o	O	ο	omicron
p	Π	π	pi
r	P	ρ	rhô
s	Σ	σ	sigma
t	T	τ	tau
u, y	Υ	υ	upsilon
ph, f	Φ	φ ou ϕ	phi
ch	X	χ	khi
s	Ψ	ψ	psi
o	Ω	ω	oméga

Tableau 1.1. -

<i>Symboles des multiples et des sous-multiples</i>		
Giga	<i>G</i>	10 ⁹
Méga	<i>M</i>	10 ⁶
kilo	<i>k</i>	10 ³
hecto	<i>h</i>	10 ²
déca	<i>da</i>	10 ¹
déci	<i>d</i>	10 ⁻¹
centi	<i>c</i>	10 ⁻²
milli	<i>m</i>	10 ⁻³
micro	μ	10 ⁻⁶
nano	<i>n</i>	10 ⁻⁹
pico	<i>p</i>	10 ⁻¹²

Tableau 1.2. -

ANNEXES - CHAPITRE 2. INTRODUCTION A LA RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

<i>Module d'élasticité E et coefficient de Poisson ν de divers matériaux</i>		
Matériaux	<i>E (GPa)</i>	<i>ν</i>
Fer	200	0.24
Aciers	210	0.30
Acier 45SCD6	220	0.285
Aciers Inox 18-10	203	0.29
Fonte grise	90	0.25
Fonte GS	140	0.275
Titane	105.5	0.32
Alliage de titane TA6V	105	0.34
Aluminium + alliages	70	0.33
Alliages AU4G (2017A)	75	0.33
Alliages AU2GN (2618A)	75	0.34
Zircal AZ8GU	72	0.34
Cuivre et alliages	100	0.33
Laiton	92	0.33
Bronze ordinaire	106	0.31
Bronze au béryllium	130	0.34
Béryllium	300	0.05
Magnésium	46	0.34
Zinc	130	0.21
Nickel	205	0.31
Nickel - Cuivre		0.32
Nickel - Chrome - fer		0.29
Nickel - fer - Chrome		0.34
Plexiglas	2.90	0.40
Verre	60	0.24
Béton (suivant qualité)	25 ... 45	0.15 ... 0.20
Bois (suivant espèce)	8 ... 13 **	0.45 *
Caoutchouc		0.45 ... 0.50
Zirconium		0.35
* : en compression	** : parallèle aux fibres	
$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$		

Tableau 2.1. - Module d'élasticité E et coefficient de Poisson ν de divers matériaux.

Module d'élasticité E en GPa en fonction de la température																	
Matériau - Température (°C)	-200	-100	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Aciers non alliés au C et C-Mn		207	201	196	193	189	187	184	178	170	160						
Aciers alliés au Ni (Ni < 3.5 %)		202	192	187	184	180	178	175	171	167	163	157					
Aciers alliés au Cr-Mo (Cr < 2 %)		209	205	200	196	193	190	187	183	179	174	166	155				
Aciers alliés au Cr-Mo (2 % < Cr < 3 %)		215	211	205	203	199	196	192	189	184	179	171	160	140			
Aciers alliés au Cr-Mo (3 % < Cr < 9 %)		216	213	207	205	200	198	194	190	184	176	171	165	158	150		
Aciers alliés au Cr (12 % < Cr < 27 %)	212	207	201	196	192	189	185	181	178	174	166	158	140	125	100		
Inox austénitiques et réfractaires	210	204	195	190	186	183	179	175	173	169	164	160	156	150	143	137	127
Nickel			207	202	199	197	194	192	190	186	182	179					
Aluminium et alliages	78	75	70	67	65	62	56	50									
Cuivre	117	114	110	108	106	104	102	99	96	93							
Cuivre-Nickel (10 % < Ni < 30 %)	142	136	130	127	124	122	119	116	113	109							
Laitons	104	101	97	95	93	90	88	85	82	80							
Bronzes	98	94	90	88	86	83	81	79	76	74							
Titane			107	104	100	95	92	87	83	79							
Zirconium			106	98	93	88	83	78	73	68	63	58					

Tableau 2.2. - Module d'élasticité E en GPa en fonction de la température.

Coefficients de sécurité en usage en construction mécanique	
Intervalle habituel pour la construction mécanique et métallique (matériaux ductiles) (vis-à vis de la limite élastique);	$S = 1.2 \dots \underline{1.5} \dots 2.5$
Intervalle habituel pour les matériaux fragiles (vis-à vis de la limite de rupture);	$S = 1.5 \dots \underline{2} \dots 2.5$
Coefficient habituel pour le bois (vis-à vis de la limite de rupture);	$S = 10$
Lors d'un calcul au flambage ou au voilement (vis-à vis de la limite élastique);	$S = 3 \dots \underline{3.5} \dots 5$
Lors de calculs à la fatigue	$S_{fat} = \underline{1.5}$ → contrainte répétée $S_{fat} = \underline{3}$ → contrainte alternée
Coefficient de choc	$k_c = \dots 1.5 \dots \underline{2} \dots$

Tableau 2.3. -

Coefficient de choc k_c	
Machines à rotation régulière, moteurs électriques, ventilateurs, pompes centrifuges	1 ... 1.2
Machines à pistons, métiers à tisser, machines-outils rotatives, appareils de levage	1.2 ... 1.5
Tamis et transporteurs à secousses, cisailles, presses, broyeurs	1.5 ... 2
Machines agissant avec chocs, laminoirs	2 ... 3

Tableau 2.4. -

Contrainte admissible en traction :

$$\sigma_{adm} = \frac{R_e \text{ ou } R_m}{S \times S_{fat} \times k_c}$$

ANNEXES - CHAPITRE 3. TRACTION - COMPRESSION

Coefficient de dilatation linéaire α en $1/^\circ\text{C}$ (Les valeurs du tableau sont à multiplier par : 10^{-6})			
Matériaux	α	Matériaux	α
Aluminium	23.7	Epoxyde	55.0
Aciers	12.0	Nylon 6-6	80.0
Aciers Inox	17.3	Nylon 6-6 +33% fibres de verre	20.0
Fonte grise	12.0	Polyéthylène	100.0
Cuivre	16.0	Polyéthylène +33% fibres de	48.0
Laiton	18.9	verre	70.0
Bronze ordinaire	12.0	Polystyrène	6.7
Plomb	29.0	Al_2O_3	10.6
Magnésium	23.0	ZrO_2 stabilisé	4.3
Zinc	30.0	SiC	3.3
Nickel	13.1	Si_3N_4	8.7
Tungstène	4.5	Granite	17.1
Invar (Fe+36%Ni)	1.5	Grès	
Silicium	3.0		
Verre	9.0		

Tableau 3.1. - Coefficients de dilatation linéaire.

Classe	M 4 à M 8	M 10 à M 16	M 18 à M 30
8.8 - 12.9	60 N/mm ²	50 N/mm ²	40 N/mm ²

Tableau 3.2. - Contraintes dynamiques admissibles pour une contrainte statique moyenne $\sigma_m = 0.7 R_e$

Matériau	Pression admissible MPa
Acier recuit	240 à 320
Acier structuraux	400 à 700
Acier trempé + revenu	750 à 1000
Acier cimenté	1400 à 1800
Acier inoxydable	210
Acier NiCr austénitique	460 à 860
Fonte	450 à 550
Fonte à graphite sphéroïdal	600 à 900
Alliage d'aluminium (forgé)	230 à 260
Alliage d'aluminium (moulé)	220 à 380
Alliage de magnésium	180 à 210
Alliage de titane	890
Composite	120

<i>Matériau</i>	<i>Pression admissible MPa</i>
St37 (acier doux)	300
St50 (acier mi-dur)	500
C45v (acier traité)	900
CDMgA19 (fonte alliée)	200
GKMgA19 (fonte alliée)	200
GKAlSi6Cu4 (fonte alliée)	300
GG22 (fonte lamellaire)	1000

Tableau 3.3. - Pression admissible de matage.

ANNEXES - CHAPITRE 5. CISAILLEMENT (technologique)

Valeurs couramment admises pour la pression admissible au matage des clavettes longitudinales ($p_{adm\ mat}$ en N/mm^2)	
Clavetage fixe	(a) 40 à 70 (b) 60 à 100 (c) 80 à 150
Clavetage glissant sans charge	(a) 15 à 30 (b) 20 à 40 (c) 30 à 50
Clavetage glissant avec charge	(a) 3 à 10 (b) 5 à 15 (c) 10 à 20
(a) : Conditions de fonctionnement plutôt mauvaises : chocs, grandes tolérances, etc... (b) : Conditions de fonctionnement moyenne (avant-projet) (c) : Bonnes conditions de fonctionnement : ajustement parfait, aucun choc, etc... <i>Remarque</i> : au dessus de $250 N/mm^2$ le matage est important.	

Tableau 5.1. - Pression admissible de matage pour un clavetage longitudinal libre.

Matière du rivet	$\tau_{adm\ rivet}$ N/mm^2
Acier A48	150...200
Z 12 N 05f	320
Cuivre rouge	150
Laiton	100
Aluminium	100

Tableau 5.2. - Contrainte admissible de cisaillement pour un rivet.

Quelques valeurs de résistance au cisaillement $\tau_{rupt\ cis}$ de différentes colles		
Loctite 601	Fixation et freinage puissant de bagues, roulements, clavettes	17 ... 22 N/mm^2
Loctite 641	Fixation et freinage de puissance moyenne de bagues, roulements, clavettes	8 ... 12 N/mm^2
Loctite 638	Assemblage puissant d'éléments cylindriques lisses qui doivent subir des efforts dynamiques	25 ... 30 N/mm^2
Loctite IS415	Colle métal sur métal, caoutchouc, plastique	20 ... 25 N/mm^2
Loctite IS495	Idem Loctite IS415	12 ... 17 N/mm^2

Tableau 5.3. - Contrainte admissible dans les colles Loctite.

Type d'acier	Métal de base		
	$\tau_{adm MB} = \frac{\tau_e}{S} \text{ N/mm}^2$		
	Cas I	Cas II	Cas III
AE 235	S = 1.50 90	S = 1.33 102	S = 1.00 136
AE 355	S = 1.73 118	S = 1.53 133	S = 1.15 177

Tableau 5.4. - Contrainte admissible dans les soudures.

ANNEXES - CHAPITRE 6. TORSION

<i>Comparaison, du point de vue résistance / poids, de différentes sections en torsion (w_t), flexion (w_f) et flambement (w_{fb})</i>				
Section		$w_t = \frac{W_t}{\sqrt{A^3}}$	$w_f = \frac{W_f}{\sqrt{A^3}}$	$w_{fb} = \frac{\sqrt{I_{\min}}}{A}$
Circulaire		0.282	0.141	0.282
Annulaire	$d_{\text{int}}/d_{\text{ext}} =$			
	0.7	0.589	0.294	0.482
	0.8	0.771	0.386	0.602
	0.9	1.171	0.586	0.871
Rectangulaire	$b/h =$			
	3	0.154	0.096	0.167
	2	0.174	0.118	0.204
	(carré). 1	0.208	0.167	0.289
	1/2	0.174	0.236	0.204
	1/3	0.154	0.289	0.167
HEA	100 \Rightarrow 450	0.05 ... 0.08	0.490 ... 1.733	0.55 ... 0.73
IPE		0.05 ... 0.06	0.947 ... 1.576	0.37 ... 0.46
IPN		... 0.06 ...	0.934 ... 1.160	0.27 ... 0.33

Tableau 6.1. - Comparaison résistance / poids de différentes sections.

k_d	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$k_{g\tau}$	0.01	0.04	0.08	0.14	0.22	0.30	0.39	0.49	0.61
$k_{g\theta}$	0.01	0.04	0.09	0.15	0.23	0.31	0.41	0.53	0.68

*Tableau 6.2. - Gain de poids pour une même contrainte $k_{g\tau}$ ou une même déformation $k_{g\theta}$
(arbre creux par rapport à l'arbre plein).*

Calcul des arbres		
	Contraintes	Déformations
Arbres pleins en torsion	$d \geq 1.72 \sqrt[3]{\frac{M_t}{\tau_{adm}}}$	$d \geq 1.79 \sqrt[4]{\frac{M_t}{G \theta_{adm}}}$
Arbres creux en torsion	$d \geq 1.72 \sqrt[3]{\frac{M_t}{(1 - k_d^4) \tau_{adm}}}$	$d \geq 1.79 \sqrt[4]{\frac{M_t}{(1 - k_d^4) G \theta_{adm}}}$
Arbre plein + rainure de clavette en torsion	$d \geq 2.08 \sqrt[3]{\frac{M_t}{\tau_{adm}}}$	
Arbre plein en torsion + flexion	$d \geq 2.17 \sqrt[3]{\frac{M_r}{\sigma_{adm}}}$ <p>avec</p> $M_r = \sqrt{M_f^2 + 0.75 M_t^2}$	
Arbre creux en torsion + flexion	$d \geq 2.17 \sqrt[3]{\frac{M_r}{(1 - k_d^4) \sigma_{adm}}}$	

Tableau 6.3. - Formules pour la détermination des diamètres des arbres pleins et creux.

ANNEXES - CHAPITRE 7. FLEXION

Coefficient de forme k_r (Cisaillement)	
Section rectangulaire	3/2
Section carrée	3/2
Section circulaire	4/3
Section annulaire mince	2
Section triangulaire	3/2

Tableau 7.1. -

Flèches admissibles f_{adm} rapportées à la portée l de la poutre	
Poutres en général	1/250
Poutres en porte-à-faux ((l) étant ici (2 ×) la longueur du porte-à-faux)	1/200
Planchers en général (solives,...)	1/250
Planchers supportant des poteaux, murs...	1/400
Poutres des planchers d'étages	1/400
Toitures en général	1/200
Toitures supportant fréquemment du personnel autre que du personnel d'entretien	1/250
Poutres de roulement et fermes : a) pont manoeuvré à bras, poutres roulantes b) ponts roulants ($Q \leq 50$ T) c) ponts roulants ($Q > 50$ T)	1/500 1/600 1/750
Poutres des passerelles d'un bâtiment industriel : a) en l'absence de rails de roulement : - poutres maîtresses - autres poutres b) en présence d'un chemin de roulement	1/400 1/250 1/600

Tableau 7.2. -

Surcharges surfaciques des planchers en N/m^2 ou Pa	
Locaux privés (immeubles d'habitation)	2000
Locaux publics (bureaux)	3000
Locaux accessibles au public (banques, grands magasins, ...)	4000
Salles de cours ordinaires	3000
Salles de cours spéciaux (laboratoires, gymnastique, ...)	5000
Salles de réunions, salle de danse non munie de sièges fixes, tribunes de sports	6000 4000
Théâtres, cinémas, ...	
Escaliers et corridors :	
a) maisons d'habitations	2500
logements individuels	4000
logements multiples	5000
b) bureaux, écoles, salles de réunions, théâtres, etc...	5000
Locaux pour archives, magasins de librairie. Suivant le cas : minimum	
Toitures, terrasses (neige comprise)	
a) accessibles pour l'entretien	1000
b) accessibles privées	2000
c) accessibles au public	5000
Balcons de maisons d'habitation	5000

Tableau 7.3. -

Caractéristiques de différents bois			
Espèces de bois	Contraintes N/mm^2		N/mm^2
	R_e	R_m	E
Chêne	23	100	11000
⊥	-	12	1600
Hêtre	-	117	6200
Pin	16	80	9000
⊥	-	5	-
Sapin	20	70	10000
Sapin du nord	-	110	-
Pitchpin	-	140	-
Bambou	-	45	-

Tableau 7.4. -

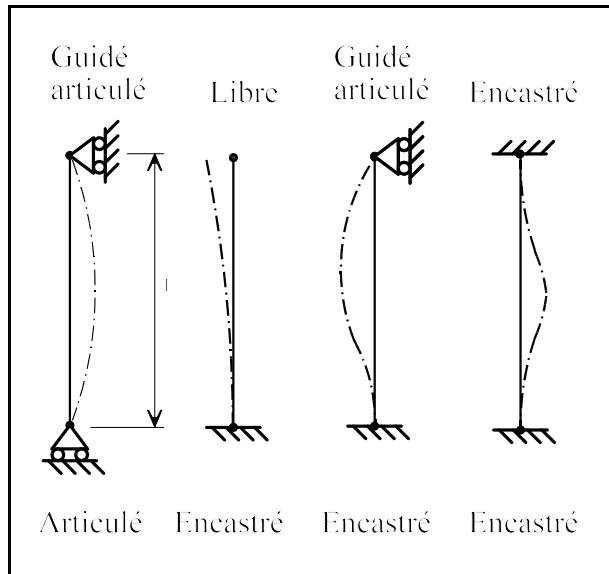
<i>Dimensions des chevrons</i>						
d \ b	100	125	150	175	200	225
19	X	X				
25	X	X	X	X		X
32				X		
38	X	X	X			
50	X	X	X			
63			X	X		
75					0	X
100					0	
X	Sections préférentielles			d	Largeur <i>mm</i>	
0	Autres sections			b	Hauteur <i>mm</i>	

Tableau 7.5. -

ANNEXES - CHAPITRE 8. NOTION DE STABILITÉ : FLAMBEMENT

Coefficient de réduction de la longueur k_f (Flambement)	
Barre bi-articulée	1
Barre simplement encastrée	2
Barre articulée et encastrée	0.7
Barre doublement encastrée	0.5

Tableau 8.6. -



Quelques valeurs de l'élancement limite d'Euler $\lambda_{lim Euler}$	
AE 235 - AE 355	94 - 76
Fonte	... 80 ...
Bois	100 ... 110

Tableau 8.7. -

Comparaison, du point de vue résistance / poids, de différentes sections flambement w_{fb}		
Section		$w_{fb} = \frac{\sqrt{I_{min}}}{A}$
Circulaire		0.282
Annulaire	$d_{int}/d_{ext} =$	0.7
		0.8
		0.871
Rectangulaire	$b/h =$	3
		2
	(carré).	1
		1/2
		1/3
HEA	100 \Rightarrow 450	0.55 ... 0.73
IPE		0.37 ... 0.46
IPN		0.27 ... 0.33

Tableau 8.8. -

Méthode de Rankine - Euler		
$0 \leq \lambda_{col} < 20$	$20 \leq \lambda_{col} < \lambda_{lim Euler}$	$180 \dots 200 \geq \lambda_{col} \geq \lambda_{lim Euler}$
Compression simple	Rankine	Euler
$\sigma = \frac{N}{A} < \sigma_{adm comp}$	$\sigma = \frac{N}{A} (1 + \bar{\lambda}^2) \leq \sigma_{adm Rankine}$	$\sigma = \frac{N}{A} \bar{\lambda}^2 \leq \sigma_{adm Euler}$
$\sigma_{adm comp} = \frac{R_e}{S_{comp}}$ ($S_{comp} \approx 1.5$)	$\sigma_{adm Rankine} = \frac{R_e}{S_{Rankine}}$ ($S_{Rankine} \approx 1.7 \dots 2 \dots 2.2$)	$\sigma_{adm Euler} = \frac{R_e}{S_{Euler}}$ ($S_{Euler} \approx 2.5 \dots 3 \dots 3.5$)
$N_{adm} = \sigma_{adm comp} A$ $= \frac{R_e A}{S_{comp}}$	$N_{adm} = \frac{\sigma_{adm Rankine} A}{(1 + \bar{\lambda}^2)}$ $= \frac{R_e A}{S_{Rankine} (1 + \bar{\lambda}^2)}$ $= \frac{\pi^2 E A}{S_{Rankine} \left(\lambda_{lim Euler}^2 + \frac{A I_{min}^2}{I_{min}} \right)}$	$N_{adm} = \frac{\sigma_{adm Euler} A}{\bar{\lambda}^2}$ $= \frac{R_e A}{S_{Euler} \bar{\lambda}^2}$ $= \frac{\pi^2 E I_{min}}{S_{Euler} I_f^2}$
Conception		
$A_{min} \geq \frac{N S_{comp}}{R_e}$ $\geq \frac{N}{\sigma_{adm}}$	Par approximation successive : $i_{g min} \geq \sqrt{\frac{I_f^2}{\left(\lambda_{lim Euler}^2 \left(\frac{\sigma_{adm} A}{N} - 1 \right) \right)}}$	$I_{min} \geq \frac{N S_{Euler} I_f^2}{\pi^2 E}$ $\geq \frac{N I_f^2 R_e}{\pi^2 E \sigma_{adm}}$

Avec :

- longueur de flambement : $l_f = k_f l$

- élanement : $\lambda_{col} = \frac{l_f}{i_g}$

- rayon de giration : $i_{g min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$

- élanement limite d'Euler : $\lambda_{lim Euler} = \pi \sqrt{\frac{E}{R_e}}$

-élanement réduit : $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{col}}{\lambda_{lim Euler}}$