

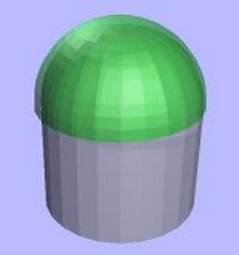
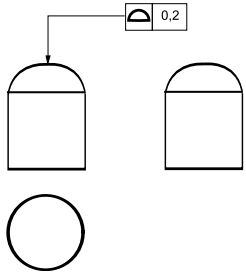
Avant-propos	III
1 Conception	2
1.1 Démarche	3
1.2 Spécifications géométriques des produits suivant les normes ISO	29
1.3 Spécifications géométriques des produits suivant les normes ASME	87
1.4 Calcul de structures	99
1.5 Méthode des éléments finis	126
1.6 Analyse des structures	153
2 Matériaux métalliques	165
2.1 Vérification de la sécurité	166
2.2 Désignation	190
2.3 Aciers	211
2.4 Aluminium et alliages d'aluminium	233
2.5 Cuivre et alliages de cuivre	242
2.6 Nickel et alliages de nickel	248
2.7 Fonte	263
2.8 Titane et alliages de titane	266
3 Fabrication	269
3.1 Traitements thermiques des aciers	270
3.2 Traitements et revêtements de surface	283
3.3 Soudage	309
4 Machines	322
4.1 Assemblage soudé	323
4.2 Assemblage vissé	339
5 Appareils à pression	367
5.1 Généralités	368
5.2 Matériaux	374
5.3 Fabrication	379
5.4 Contrôle	384
5.5 Conception par formule	386
6 Tuyauterie	392
6.1 Généralités	393
6.2 Analyse sous pression	411
6.3 Analyse globale	415
6.4 Supports	421
7 Charpente	424
7.1 Généralités	425
7.2 Chargement	431
7.3 Vérification de la déformation excessive	442
7.4 Vérification des instabilités	446
8 Levage	448
8.1 Vérification des ponts roulants	449
Index	471

Type de tolérance	Caractéristique tolérancée	Symbole
tolérances de battement	battement circulaire	
	battement total	

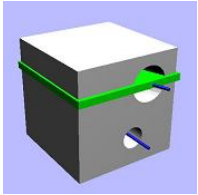
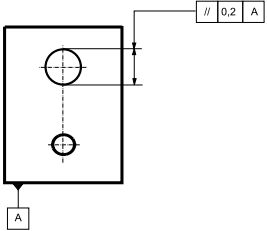
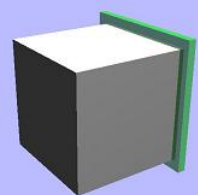
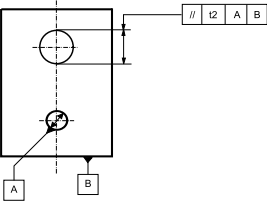
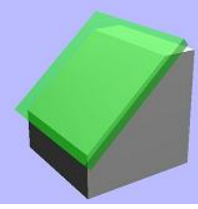
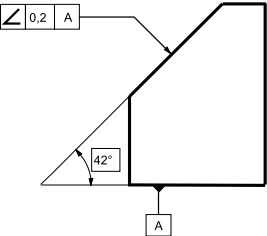
Les tolérances de surface quelconque peuvent également servir de tolérance de position lorsqu'elles sont associées à des références.

Tolérances géométriques de forme

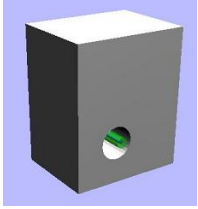
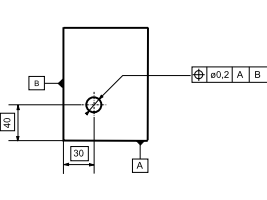
Zone de tolérance	Dessin	Interprétation
		Une ligne quelconque de la surface supérieure parallèle au plan de projection dans lequel l'indication est donnée, doit être contenue entre 2 droites parallèles distantes de 0,2 mm
		la surface doit être comprise entre 2 plans parallèles distants de 0,2
		le pourtour de chaque section droite du diamètre extérieur doit être compris entre 2 cercles coplanaires concentriques distants de 0,2
		la surface considérée doit être comprise entre 2 cylindres coaxiaux distants de 0,2
		dans chaque section parallèle au plan de la projection le profil considéré doit être compris entre 2 lignes enveloppes des cercles de diamètres 0,2 dont les centres sont situés sur une ligne ayant le profil géométrique correct

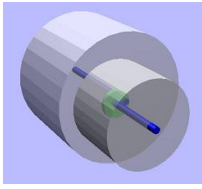
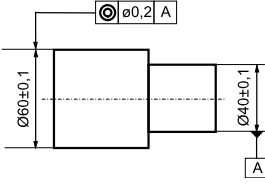
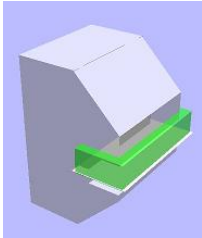
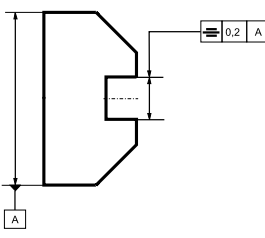
Zone de tolérance	Dessin	Interprétation
		<p>la surface considérée doit être comprise entre 2 surfaces enveloppes des sphères de diamètres 0,2 dont les centres sont situés sur une surface ayant la forme géométrique correcte</p>

Tolérances géométriques d'orientation

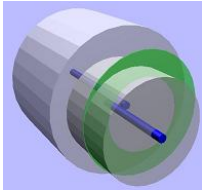
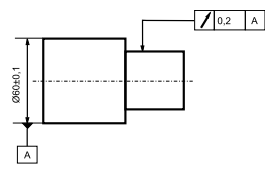
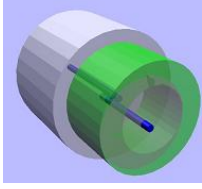
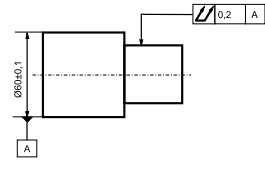
Zone de tolérance	Spécification	Interprétation
		<p>l'élément toléré doit être compris entre deux plans parallèles distants de t2 parallèles au plan associé à la surface A.</p>
		<p>la surface tolérée doit être comprise entre 2 plans parallèles distants de 0,2 et perpendiculaires à la surface de référence A</p>
		<p>la surface inclinée doit être comprise entre 2 plans parallèles distants de 0,2 et inclinés de 42° par rapport à la surface de référence A</p>

Tolérances géométriques de position

Zone de tolérance	Spécification	Interprétation
		<p>L'axe du trou doit être compris dans un cylindre de diamètre 0,2 dont l'axe est dans la position théoriquement exacte définie</p>

Zone de tolérance	Spécification	Interprétation
		<p>l'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,2 coaxiale à l'axe de référence A</p>
		<p>le plan médian de la rainure doit être compris entre 2 plans parallèles distants de 0,2 et disposés symétriquement au plan médian par rapport à l'élément de référence A</p>

Tolérances géométriques de battement

Zone de tolérance	Spécification	Interprétation
		<p>le battement radial ne doit pas dépasser 0,2 dans chaque plan de mesurage pendant une révolution complète autour de l'axe de référence A</p>
		<p>le battement total radial ne doit pas dépasser 0,2 en chaque point de la surface spécifiée durant plusieurs révolutions autour de l'axe de référence A, et avec un mouvement axial relatif entre la pièce et l'instrument de mesurage. Le mouvement doit être guidé le long d'une ligne de contour de forme théoriquement parfaite, étant en position correcte par rapport à l'axe de référence</p>

Tolérances géométriques de position des trous

La norme ISO 5458 précise l'application des tolérances de position des points, des lignes droites et des surfaces planes décrites dans la norme ISO 1101. Une application importante de cette norme est la position des axes des trous dans une pièce ou de faces planes. La position des autres types de lignes ou surfaces (cônes, surfaces quelconques, etc) est spécifiée avec le symbole de ligne ou surface quelconque suivant ISO 1660.

La norme ISO 5458 de 1998 est en cours de révision pour assurer une parfaite conformité avec l'évolution de la norme ISO 1101 sur les tolérances géométriques. En particulier l'usage du symbole CZ (zone commune) devrait être généralisé pour les groupes de trous. Cette pratique n'a pas été anticipée ici sur les dessins bien qu'elle soit recommandée par la norme ISO 1101.

Règles suivant ISO 5458:1998		
Règles	Référence ISO 5458:1998	Commentaires
<p>Les éléments tolérancés en localisation qui sont sur la même ligne de centre ou le même axe sont considérés comme un groupe en position théorique exacte suivant les dimensions théoriques exactes ou TED ('Theoretical Exact Dimension') sauf si :</p> <ul style="list-style-type: none"> les éléments sont associés à des références spécifiées différentes une instruction telle que 'position angulaire indifférente' est indiquée près du cadre de tolérance 	§4.3	IL est conseillé d'ajouter le symbole CZ dans le cadre de tolérance afin d'indiquer qu'il s'agit d'un groupe de trous et pour anticiper sur l'évolution probable de la norme
<p>Les TED de 0°, 90°, 180° et de 0 mm entre :</p> <ul style="list-style-type: none"> des éléments tolérancés en localisation non rapportés à une référence spécifiée des éléments tolérancés en localisation rapportés à la même référence spécifiée des éléments tolérancés en localisation et leurs références spécifiées associées <p>sont implicites.</p>	§4.3	TED : dimensions théoriquement exactes.
<p>Les éléments tolérancés répartis sur un cercle complet sont considérés régulièrement espacés en position théorique exacte sauf spécification contraire.</p>	§4.4	Par défaut les trous sur un même cercle de perçage sont considérés également répartis.
<p>Des éléments sur un même axe et tels que :</p> <ul style="list-style-type: none"> ils ne sont pas liés à une référence spécifiée; ils sont liés exactement à la même référence <p>font partie du même modèle sauf indication contraire tel que 'position angulaire indifférente'</p>	§4.4	la mention position angulaire indifférente permet de laisser libre la position angulaire du groupe.
<p>La tolérance de position peut être spécifiée dans une seule direction par des zones de tolérance constituées d'espaces entre deux plans parallèles positionnés sur les TED et orientées perpendiculairement à la direction de la flèche qui désigne l'élément tolérancé.</p>	§4.5.1	il est possible de spécifier la tolérance de plusieurs faces parallèles.
<p>Les tolérances de position peuvent être indiquées dans deux directions perpendiculaires avec des valeurs différentes</p>	§4.5.2	Il est possible de spécifier des tolérances différentes dans deux directions perpendiculaires.

Règles suivant ISO 5458:1998		
Règles	Référence ISO 5458:1998	Commentaires
Les tolérances de position peuvent être indiquées dans toutes les directions en utilisant des zones cylindriques	§4.5.3	La mention du diamètre \varnothing dans le cadre de la zone de tolérance spécifie une zone de tolérance cylindrique.
Si un groupe d'éléments est positionné individuellement et pour l'ensemble du groupe on peut indiquer deux spécifications de localisation qui doivent être respectées indépendamment.	§5	Il est possible de spécifier des tolérances différentes pour la position des trous entre eux et pour la position du groupe de trous par rapport à des faces de la pièce par exemple.
Exemple de trous alignés		
Dessin	Commentaire	
	<p>La zone de tolérance est constituée de quatre cylindres alignés perpendiculaires à la référence A et contraints par les dimensions (TED).</p>	
Exemple de positions dans deux directions		
Dessin	Commentaire	
	<p>Les zones de tolérance sont alignées sur le modèle de dimensions théoriques exactes. Le symbole CZ sera sans doute nécessaire dans des versions ultérieures de la norme.</p>	
Exemple de trous en position sur un rectangle		
Dessin	Commentaire	
	<p>Les zones de tolérance sont cylindriques. L'ensemble des trous n'est pas positionné par rapport aux bords de la pièce. Les zones de tolérance sont positionnées en fonction du système de dimensions exactes (TED). Le symbole CZ sera sans doute nécessaire dans des versions ultérieures de la norme.</p>	

Exemple de trous avec plusieurs spécifications de localisation	
Dessin	Commentaire
	<p>La première spécification permet de localiser les trous par rapport au bord de la pièce. La deuxième spécification permet de localiser plus précisément les trous entre eux. Le symbole CZ sera sans doute nécessaire dans des versions ultérieures de la norme.</p>
Groupe de trous en position angulaire déterminée	
Dessin	Commentaire
	<p>La position angulaire du groupe de trous est déterminée par l'angle. Le symbole CZ sera sans doute nécessaire dans des versions ultérieures de la norme.</p>
Groupe de trous en position angulaire indifférente	
Dessin	Commentaire
	<p>La position angulaire du groupe de trous est indifférente. Le symbole CZ sera sans doute nécessaire dans des versions ultérieures de la norme.</p>
Groupe de trous en position angulaire déterminée	
Dessin	Commentaire
	<p>La position angulaire du groupe de trou est déterminée par la disposition des trous par rapport à la référence. Le symbole CZ sera sans doute nécessaire dans des versions ultérieures de la norme.</p>

Paramètres influents	
Paramètre	Commentaire
Matériau	La résistance en fatigue des assemblages soudés de pièces en acier est similaire pour tous les aciers de construction mécano-soudée d'usage général soudables. Ce comportement est très différent de la résistance en statique où la contrainte limite d'élasticité joue un rôle primordial.
Soudure	La géométrie locale de la soudure et de l'assemblage soudés joue un rôle très important dans la résistance à la fatigue des assemblages soudés. Ceci est très différent du comportement en statique où les concentrations de contrainte locales peuvent souvent être négligées pour les aciers ductiles.

Cumul des dommages

Dans le cas de l'application de plusieurs types de cycles, il est nécessaire de vérifier que le cumul des dommages de fissuration des différents types de cycles n'est pas trop important. La règle de Palmgren-Miner est souvent utilisée.

Règle de Palmgren-Miner

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \leq D_L$$

i : Numéro du type de cycles considéré
 n : Nombre de types de cycles ayant des étendues différentes
 n_i : Nombre de cycles de type i appliqués sur la structure
 N_i : Nombre de cycles admissibles pour le type de cycle i
 D_{limite} : Valeur limite du dommage cumulé

$$D \leq D_L$$

La valeur limite D_L est théoriquement égale à 1. Toutefois, compte tenu que cette règle de cumul linéaire des dommages de fissuration n'est pas toujours confirmée par l'expérience, une valeur plus faible doit être en général retenue.

$$0,5 \leq D_L \leq 1,0$$

Description de la méthode de la contrainte nominale

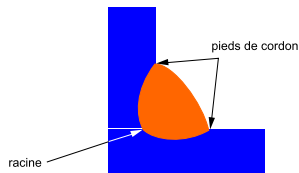
La méthode de la contrainte nominale s'applique pour des configurations où il est possible de calculer l'étendue de variation de contrainte par les méthodes de la résistance des matériaux suivant la théorie des poutres dans la zone de fissuration étudiée.

Document de référence


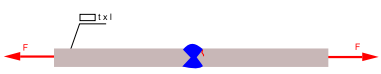

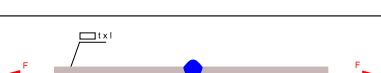


Document	Titre
IIW document XIII-1539-96 / XV-845-96	Recommandations pour la conception en fatigue des assemblages et des composants soudés (A. Hobbacher)

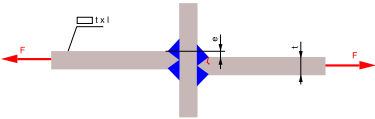
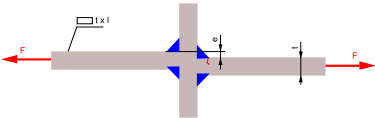
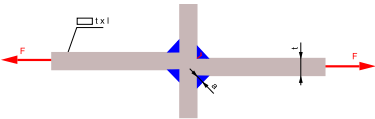
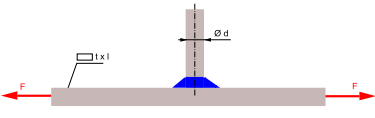
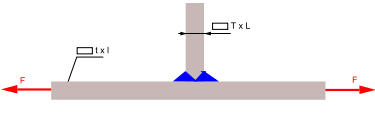
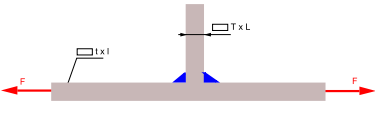
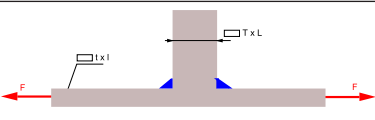
Démarche de vérification


Étapes	Description
Zones de fissuration des zones non soudées	Les zones de fissuration des zones non soudées seront vérifiées avec des règles appropriées.
Zones de fissuration des zones soudées	Les zones de fissuration possibles sont en pied de cordon ou à la racine du cordon.

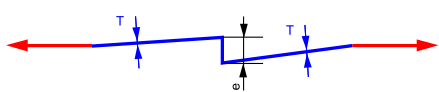


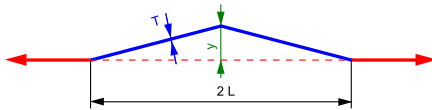
Démarche de vérification	
Étapes	Description
Détermination de la classe de l'assemblage	La classe de l'assemblage est déterminée à partir du catalogue d'assemblages soudés.
Étendue de variation de contrainte nominale	L'étendue de variation de la contrainte nominale est calculée en considérant l'effort non pondéré et la section de la pièce fissurée en pied de cordon ou la section du plan de gorge.
Nombre de cycles admissibles	Le nombre de cycles admissibles peut être calculé à partir de la courbe S-N qui correspond à la classe de l'assemblage pour la valeur de l'étendue de variation de contrainte calculée.
	Dans le cas où il existe plusieurs types de cycles, c'est-à-dire pour un chargement à amplitude variable, il est nécessaire de répéter cette opération en utilisant la courbe S-N modifiée valable pour des cycles multiples.
Cumul des dommages	S'il existe plusieurs types de cycles, la règle de Palmgren-Miner doit être vérifiée.
Sécurité	Un coefficient de sécurité entre 1,0 et 1,5 peut être pris en multipliant les chargements par ce coefficient. Les courbes S-N sont issues d'un traitement statistique. Les courbes sont généralement tracées pour une valeur de moins deux ou trois écarts-types par rapport à la moyenne.

Catalogue d'assemblage soudé			
Illustration	Commentaire	Classe	
		Acier	Alliage d'aluminium
	La soudure est meulée et contrôlée à 100 %.	125	50
	Angle en pied de cordon inférieur à 30 °. La soudure est contrôlée.	100	40
	Soudure contrôlée. Angle inférieur à 50 ° pour les alliages d'aluminium.	80	32
	Fissuration en racine avec une latte support amovible.	80	
	Fissuration en racine avec une latte support permanente.	71	25
	Soudure pleine pénétration d'un seul côté avec contrôle de la racine.	71	28
	Soudure pleine pénétration d'un seul côté sans contrôle de la racine.	45	18

Catalogue d'assemblage soudé			
Illustration	Commentaire	Classe	
		Acier	Alliage d'aluminium
	Fissuration en pied de cordon pour une préparation en K avec pleine pénétration, pieds de cordon meulés $e \leq 0,15t$	80	28
	Fissuration en pied de cordon pour une préparation en K avec pleine pénétration $e \leq 0,15t$	71	25
	Fissuration en pied de cordon avec soudure d'angle ou pénétration partielle $e \leq 0,15t$	63	22
	Fissuration en racine avec soudure d'angle ou pénétration partielle	45	16
	Soudure brut de soudage	80	28
	Préparation en K, pieds de cordons meulés $T \leq t$	100	36
	Soudures d'angle, pieds de cordons meulés $T \leq t$	100	36
	Soudures d'angle $T \leq t$	80	28
	$T > t$	71	25

Catalogue d'assemblage soudé			
Illustration	Commentaire	Classe	
		Acier	Alliage d'aluminium
	$L \leq 50 \text{ mm}$	80	28
	$L \leq 150 \text{ mm}$	71	25
	$L \leq 300 \text{ mm}$	63	20
	$L > 50 \text{ mm}$	50	18
Prise en compte des paramètres influents sur la résistance en fatigue			
<p>Il est nécessaire de faire des corrections à la procédure de vérification des assemblages soudés en fatigue pour tenir compte des phénomènes les plus importants tels que les défauts géométriques de l'assemblage soudé, la température ou les épaisseurs importantes.</p>			
Facteurs de correction			
Grandeur	Commentaire		
Température	La résistance en fatigue diminue quand la température augmente. Il est nécessaire de faire une correction à partir de 100 °C.		
Épaisseur	Il est nécessaire de faire une correction lorsque les épaisseurs sont supérieures à 25 mm.		
Corrosion	Les effets de corrosion peuvent accélérer la fissuration de fatigue dans certains cas.		
Défauts géométriques	Les défauts géométriques des assemblages soudés doivent être pris en compte lorsqu'ils dépassent les défauts réels déjà pris en compte sur les éprouvettes qui ont permis le tracé de la courbe S-N utilisée.		
Facteur de correction de température			
Relation	Commentaire		
$k_T = \min\left(1 ; 1,03 - 1,5 \cdot 10^{-4} T - 1,5 \cdot 10^{-6} T^2\right)$ <p>k_T : Facteur de correction due à la température</p> <p>Avec</p> $T = \frac{3}{4} T_{\max} + \frac{1}{4} T_{\min}$ <p>T_{\max} : Température maximale T_{\min} : Température minimale</p>	Le facteur de correction de température suivant EN 13445-3 est valable pour des aciers ferritiques.		
Facteur de correction d'épaisseur			
Relation	Commentaire		
$k_e = \min\left[1 ; \left(\frac{25}{e}\right)^{\frac{1}{4}}\right]$ <p>k_e : Facteur de correction d'épaisseur e : Épaisseur minimale en millimètres</p>	Le facteur de correction d'épaisseur suivant EN 13445-3 doit être pris en compte pour des épaisseurs supérieures à 25 mm.		

Facteur de correction d'épaisseur	
Relation	Commentaire
$N = \frac{C}{\left(\frac{\Delta\sigma}{k_T k_e}\right)^m}$ <p>N : Nombre de cycles admissibles $\Delta\sigma$: Étendue de variation de la contrainte</p>	L'effet de la température et de l'épaisseur sont pris en compte en remplaçant l'étendue de variation de contrainte par l'étendue de variation de contrainte divisée par les facteurs de correction.
Prise en compte des défauts géométriques des assemblages	
Relation	Commentaire
$k_{m,eff} = 1 + (k_{m,eff,axial} - 1) + (k_{m,eff,angulaire} - 1)$ <p>$k_{m,eff}$: Facteur de concentration de contrainte pour tenir compte des désalignements $k_{m,eff,axial}$: Facteur de concentration de contrainte pour tenir compte du désalignement axial $k_{m,eff,angulaire}$: Facteur de concentration de contrainte pour tenir compte du désalignement angulaire</p>	Le coefficient $k_{m,eff}$ permet d'augmenter la contrainte nominale calculée pour tenir compte des concentrations de contraintes locales dues aux défauts géométriques de l'assemblage.
Facteurs de concentration de contrainte	
<p>Une partie de la concentration de contrainte est déjà prise en compte dans les courbes S-N utilisées car les éprouvettes contiennent des défauts géométriques. Le coefficient $k_{m,eff}$ permet de tenir compte de la concentration de contrainte lorsque l'assemblage réel a un défaut géométrique plus important que les éprouvettes.</p>	
Assemblages bout à bout ou transverse	$k_{m,eff,axial} = \max\left(\frac{k_{m,axial}}{1,3}; 1\right)$ $k_{m,eff,angulaire} = \max\left(\frac{k_{m,angulaire}}{1,3}; 1\right)$
Assemblages cruciformes	$k_{m,eff,axial} = \max\left(\frac{k_{m,axial}}{1,45}; 1\right)$ $k_{m,eff,angulaire} = \max\left(\frac{k_{m,angulaire}}{1,45}; 1\right)$
<p>Cette relation est valable pour un désalignement axial sur des tôles planes avec des chargements éloignés de la zone de soudure et sans bridage.</p> 	$k_m = 1 + 3\frac{e}{l}$

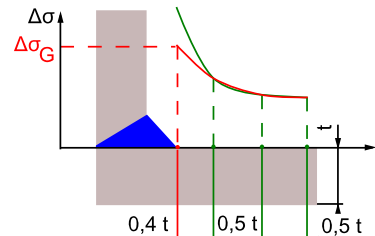
<p>Cette relation est valable pour un désalignement angulaire sur des tôles planes.</p> 	$k_m = 1 + 6 \frac{y \tanh(\beta)}{\beta}$ <p>k_m : Facteur de correction pour tenir compte du désalignement angulaire de deux plaques tanh : Fonction tangente hyperbolique</p> $\beta = 2 \frac{L}{T} \sqrt{\frac{3\sigma_m}{E}}$ <p>σ_m : Contrainte de traction en absence de désalignement dans les plaques E : Module de Young du matériau des plaques</p>
---	---

Vérification de la fatigue par la méthode de la contrainte géométrique

Introduction

La méthode de la contrainte géométrique permet de vérifier la résistance en fatigue des assemblages soudés constitués de tôles minces pour le cas de la fissuration en pied de cordon uniquement. Cette méthode est utilisée dans les cas où la contrainte nominale ne peut être calculée par les méthodes de la théorie des poutres.

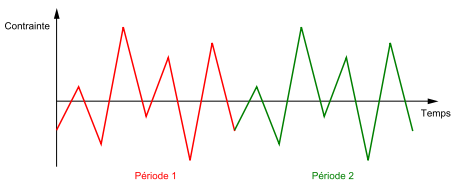
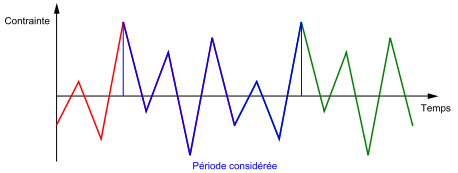
Présentation de la contrainte géométrique

Illustration	Définition
	<p>La contrainte géométrique est calculée par extrapolation d'une parabole passant par trois points de contraintes calculée par éléments finis. La contrainte géométrique est déterminée au point de fissuration en pied de cordon.</p>
Principe	<p>La notion de contrainte géométrique ou contrainte du point chaud ('hot spot stress' en anglais) permet de définir une contrainte représentative de la fissuration en fatigue sans avoir à calculer ou à mesurer la contrainte au pied du cordon.</p>
Courbes S-N	<p>L'utilisation de la contrainte géométrique nécessite l'utilisation de courbes S-N spécifiques.</p>
Définition de la contrainte géométrique	<p>La contrainte géométrique est souvent définie comme la contrainte principale maximale. Dans certains documents, la contrainte géométrique est une contrainte équivalente de Von Mises ou de Tresca.</p>
Calcul de la contrainte géométrique	<p>La contrainte géométrique est généralement calculée par la méthode des éléments finis. Outre les règles de maillage habituelles pour assurer une bonne qualité des résultats, le calcul de la contrainte géométrique nécessite un maillage adapté ou des procédures de dépouillement particulières.</p>


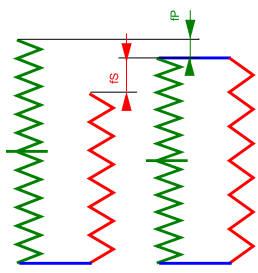
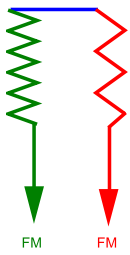
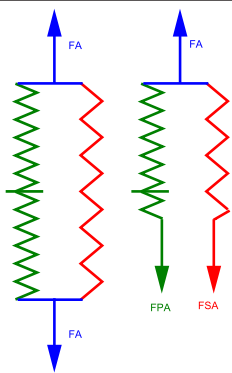
Utilisation

La méthode de la contrainte géométrique a été très utilisée pour la conception des assemblages soudés des plateformes pétrolières. Cette méthode est maintenant très utilisée dans de nombreux domaines industriels pour la vérification des assemblages soudés.

Documents de référence	
Document	Titre
IIW document XIII-1539-96 / XV-845-96	Recommandations pour la conception en fatigue des assemblages et des composants soudés (A. Hobbacher)
IIW-1430-00	Fatigue analysis of welded components - Designer's guide to the structural hot-spot stress approach (E. Niemi, W. Fricke, S.J. Maddox)
IIW XIII-1804-99 / XV-1035-99	Fatigue design procedure for welded hollow section joints (Xiao Ling Zhao, J.A. Packer)
Document IIW : Recommandations pour la conception en fatigue des assemblages et composants soudés	
Grandeur	Commentaire
Contrainte géométrique	La contrainte principale maximale est calculée.
Modélisation	La modélisation du cordon de soudure n'est pas nécessaire. Il est toutefois nécessaire d'obtenir une bonne représentation de la rigidité. Pour cela la cordon peut être modélisé par une plaque équivalente.
Courbes S-N pour les aciers	
Type d'assemblage	Classe de référence
Assemblage bout à bout	Il est conseillé d'utiliser les classes 125, 100 ou 80 selon le type de soudure.
Assemblages avec soudure d'angle	Il est conseillé d'utiliser la classe 112 pour les soudures meulées en pied de cordon ou 100 pour les autres.
Assemblages en croix	Il est conseillé d'utiliser les classes 80, 71 ou 63 suivant le type de soudure.
Équipement sous pression	
La méthode de la contrainte géométrique est utilisée dans la vérification de la résistance en fatigue des assemblages soudés sur les appareils à pression et les tuyauteries en particulier.	
Normalisation	
Norme	Titre
EN 13445-3	Réceptacles sous pression non soumis à la flamme Partie 3 : Conception
EN 13480-3	Tuyauteries industrielles métalliques Partie 3 : Conception et calcul
Ossatures de bâtiment en acier	
La méthode de la contrainte géométrique est utilisée pour la justification des assemblages soudés des ossatures de bâtiments en acier.	
Normalisation	
Norme	Titre
EN 1991-1-9	Eurocode 3 Calcul des structures en acier Partie 1-9 : Fatigue

Comptage de cycles	
Introduction	
Des méthodes de comptage de cycles ont été mises au point pour permettre de transformer un signal périodique en une combinaison de cycles. Ceci permet d'utiliser ensuite les méthodes de vérification pour chaque type de cycle et de vérifier le cumul de l'endommagement par une règle de Palmgren-Miner par exemple.	
Évolution des contraintes	
Type	Commentaire
Aléatoire	L'évolution aléatoire des contraintes correspond par exemple au cas d'un véhicule de transport ou d'un engin de levage pour lesquels le fonctionnement en service n'est pas connu a priori. Les évolutions purement aléatoires peuvent être traitées par des méthodes spécifiques. Toutefois dans certains cas il est possible de considérer une période de service comme période de référence qui se répète à l'identique pendant toute la durée de vie du produit. Dans ce cas l'évolution des contraintes devient périodique.
Périodique	C'est le cas par exemple d'une unité de production qui fonctionne avec un cycle connu et qui se répète pendant toute la durée de vie de l'appareil.
Méthode du réservoir	
La méthode du réservoir ou 'Rainflow' en anglais est une des méthodes les plus utilisées pour déterminer les cycles présents dans une évolution périodique.	
Normalisation	
Norme	Titre
ASTM E1049 - 85 (2011)	Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis
ISO 12110-2:2013	Matériaux métalliques - Essais de fatigue - Essais sous amplitude variable - Partie 2 : méthodes de comptage des cycles et méthodes associées de réduction des données.
A03-406:1993	Produits métalliques - Fatigue sous sollicitations d'amplitude variable - Méthode Rainflow de comptage des cycles.
Principe de la méthode du réservoir	
Illustration	Commentaire
	L'évolution de la contrainte est un signal périodique.
	La période considérée est située entre les deux maxima.

Principe de la méthode du réservoir	
Illustration	Commentaire
	<p>La courbe est identifiée à un réservoir plein de liquide. Le niveau de liquide représente la valeur de l'étendue d'un premier type de cycle.</p>
	<p>Le réservoir est vidé en supposant la présence d'un robinet dans la partie la plus basse de la courbe. Un deuxième niveau est identifié qui correspond à la valeur de l'étendue de variation de contrainte d'un deuxième type de cycle.</p>
	<p>Le réservoir est vidé en supposant la présence d'un robinet dans la partie la plus basse de la courbe. Un niveau est identifié qui correspond à la valeur de l'étendue de variation de contrainte d'un troisième type de cycle.</p>
	<p>Le réservoir est vidé en supposant la présence d'un robinet dans la partie la plus basse de la courbe. Un niveau est identifié qui correspond à la valeur de l'étendue de variation de contrainte d'un quatrième type de cycle.</p>

Généralités	
Description d'un assemblage vissé	
<p>Les assemblages vissés sont constitués des pièces assemblées et de vis, de boulons ou de goujons filetés. Les assemblages filetés sont très résistants en statique et en fatigue mais leur mise en œuvre peut être délicate en particulier pour la maîtrise du serrage.</p>	
Comportement d'un assemblage vissé	
	<p>Les pièces et la vis peuvent être modélisées par des ressorts. La souplesse est l'inverse de la raideur.</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $\delta_P = \frac{1}{k_P}$ $\delta_S = \frac{1}{k_S}$ </div> <p>δ_P, δ_S : Souplesse de l'assemblage des pièces et de la vis k_P, k_S : Raideur de l'assemblage des pièces et de la vis</p>
	<p>Après montage, l'assemblage de pièces est raccourci et la vis est allongée. f_S et f_P sont les elongations de la vis et de l'assemblage de pièces.</p>
	<p>Après montage, la force à l'intérieur de l'assemblage de pièces et la force dans la vis sont égales pour respecter l'équilibre statique.</p>
	<p>En fonctionnement, une force de service axiale F_A est appliquée sur l'assemblage. La force de service doit être équilibrée par la force interne dans l'assemblage des pièces et la force interne dans la vis.</p>

Aire de la section résistante d'une vis	
Relation	Commentaire
$A_s = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2$ <p>A_s : Aire de la section résistante de la vis d_2 : Diamètre sur flanc de la vis d_3 : Diamètre de noyau de la vis</p>	<p>La section résistante d'une vis a été établie à partir d'études expérimentales. Le diamètre résistant est donc la moyenne du diamètre sur flanc et du diamètre de noyau.</p> $d_s = \frac{d_2 + d_3}{2}$
Facteur de charge	
<p>Le facteur de charge représente la proportion de la charge de service qui passe dans la vis. Ce facteur peut être très faible si la souplesse de l'assemblage des pièces est beaucoup plus petite que la souplesse de la vis.</p>	
Définition du facteur de charge	
Relation	Commentaire
<p>L'équilibre en service conduit à l'équation suivante :</p> $F_A = F_{PA} + F_{SA}$ <p>F_A : Force axiale de service appliquée sur la pièce à hauteur de la tête de vis F_{PA} : Sollicitation dans la pièce en conditions de service F_{SA} : Sollicitation dans la vis en conditions de service</p>	
$f_{SA} = f_{PA}$ <p>f_{PA}, f_{SA} : Élongation de la pièce et de la vis en conditions de service</p>	<p>L'élongation de la vis et celle de l'assemblage de pièces sont identiques.</p>
$f_{SA} = \delta_S F_{SA}$ $f_{PA} = \delta_P F_{PA}$ <p>δ_P, δ_S : Souplesse de l'assemblage de pièces et de la vis</p>	<p>Les élongations sont reliées aux forces de service par l'intermédiaire des souplesses.</p>
$\delta_S F_{SA} = \delta_P F_{PA}$ $F_{PA} = \frac{\delta_S}{\delta_P} F_{SA}$	<p>L'égalité des élongations permet d'obtenir une relation entre la force de service dans l'assemblage de la pièce et la force dans la vis.</p>
$F_A = F_{SA} + \frac{\delta_S}{\delta_P} F_{SA}$ $F_{SA} = \frac{\delta_P}{\delta_S + \delta_P} F_A$	<p>En remplaçant dans l'équation d'équilibre, il est possible d'obtenir une relation entre la force de service dans la vis et la force de service sur l'assemblage.</p>
$\Phi_0 = \frac{\delta_P}{\delta_S + \delta_P}$ <p>Φ_0 : Facteur de charge de l'assemblage</p>	<p>Le facteur de charge de l'assemblage représente la proportion de la charge de service reprise par la vis.</p>

Normalisation	
Introduction	
Les règles FEM (Fédération européenne de manutention) section 1 FEM 1.001 sont utilisables pour la justification des appareils lourds de levage et de manutention.	
Composition des règles FEM	
Cahier	Titre
Cahier 1	Objet et domaine d'application
Cahier 2	Classement et sollicitations des charpentes et des mécanismes
Cahier 3	Calcul des contraintes dans la charpente
Cahier 4	Calcul et choix des éléments de mécanismes
Cahier 5	Équipement électrique
Cahier 6	Le cahier 6 sur la stabilité statique des appareils a été supprimé et a été remplacé par le paragraphe 9.15.
Cahier 7	Règles de sécurité
Cahier 8	Charges d'essai et tolérances
Cahier 9	Suppléments et commentaires aux cahier 1 à 8.
Normes européennes	
La normalisation européenne est en évolution pour les appareils de levage.	
Normalisation	
Norme	Titre
EN 15011:2014	Appareils de levage à charge suspendue - Ponts roulants et portiques
EN 13001-1:2009	Appareils de levage à charge suspendue - Conception générale - Partie 1 : principes généraux et prescriptions
EN 13001-2:2014	Sécurité des appareils de levage à charge suspendue - Conception générale - Partie 2 : charge - Sécurité des appareils de levage à charge suspendue
EN 13001-3-1:2013	Appareils de levage à charge suspendue - Conception générale - Partie 3-1 : états limites et vérification d'aptitude des structures en acier
EN 13001-3-2:2014	Appareils de levage à charge suspendue - Conception générale - Partie 3-2 : états limites et vérification d'aptitude des câbles en acier mouflés
EN 13001-3-3:2014	Appareils de levage à charge suspendue - Conception générale - Partie 3-3 : états limites et vérification d'aptitude des contacts galet/rail
XP CEN/TS 13001-3-5:2010	Appareils de levage à charge suspendue - Conception générale - Partie 3-5 : états-limites et vérification d'aptitude des crochets forgés
EN 13135:2013	Appareils de levage à charge suspendue - Sécurité - Conception - Prescriptions relatives à l'équipement

Chemins de roulement										
Les chemins de roulement sont souvent rattachés au bâtiment. Le calcul des chemins de roulement peut être réalisé suivant l'Eurocode 3.										
Normalisation - Eurocode 3 Chemins de roulement										
EN 1993-6:2007	Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 6 : chemins de roulement									
NF EN 1993-6/NA:2011	Eurocode 3 : calcul des structures en acier - Partie 6 : chemins de roulement - Annexe Nationale à la EN 1993-6:2007 - Chemins de roulement									
Classement										
Introduction										
Les engins de levage sont classés en catégories afin d'optimiser leur conception et pour conserver le même niveau de sécurité. La procédure de classement et les cas de charges à prendre en compte sont décrits dans le cahier 2 des règles FEM (Fédération européenne de manutention).										
Caractéristiques du classement										
Paramètres	Commentaire									
Durée d'utilisation	La durée d'utilisation est prise en compte dans le classement.									
Spectre de charge	Les chargements d'un appareil de levage sont caractérisés par des niveaux de charges mais aussi par la fréquence de levage des différents niveaux de charges.									
Sollicitations ou contraintes	Le niveau de contrainte dépend du classement.									
Engins										
Les engins de levage sont classés en 8 groupes.										
Groupes d'engins										
	U 0	U 1	U 2	U 3	U 4	U 5	U 6	U 7	U 8	U 9
Q ₁	A ₁	A ₁	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈
Q ₂	A ₁	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₈
Q ₃	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₈	A ₈
Q ₄	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₈	A ₈	A ₈
Définition des variables										
Variable	Définition									
A_i	Groupes d'engin de levage									
U_i	Classes d'utilisation									
Q_i	Classes de spectre de charge									
Définition										
Variable	Définition									
n_{\max}	Nombre maximal de cycles de levage									

Classes d'utilisation										
Classe utilisation	n_{\max}									
U_0	$n_{\max} \leq 16000$									
U_1	$16000 < n_{\max} \leq 32000$									
U_2	$32000 < n_{\max} \leq 63000$									
U_3	$63000 < n_{\max} \leq 125000$									
U_4	$125000 < n_{\max} \leq 250000$									
U_5	$250000 < n_{\max} \leq 500000$									
U_6	$500000 < n_{\max} \leq 1000000$									
U_7	$1000000 < n_{\max} \leq 2000000$									
U_8	$2000000 < n_{\max} \leq 4000000$									
U_9	$n_{\max} > 4000000$									
Définition du spectre de charge										
Définition					Commentaire					
$k_p = \sum_{i=1}^r \left(\frac{m_i}{m_{\max}} \right)^3 \frac{n_i}{n_{\max}}$ <p> k_p : Spectre de charge m_i : Charge i m_{\max} : Charge maximale n_i : Nombre de cycles pour la charge i r : Nombre de paliers de charge </p>					Le spectre de charge définit le chargement par rapport au risque de fissuration par fatigue.					
Classes de spectres de charge										
Classe de spectre de charge					Condition					
Q_1					$k_p \leq 0,125$					
Q_2					$0,125 < k_p \leq 0,250$					
Q_3					$0,250 < k_p \leq 0,500$					
Q_4					$0,500 < k_p \leq 1,000$					
Ensemble de mécanismes										
Les ensembles de mécanismes sont classés suivant 8 groupes.										
Groupe d'ensembles de mécanismes										
	T 0	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T 9
L_1	M_1	M_1	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
L_2	M_1	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_8
L_3	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_8	M_8
L_4	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_8	M_8	M_8

Classes de durées d'utilisation											
Classe de durée d'utilisation				Durée totale d'utilisation T (h)							
T_0				$T \leq 200$							
T_1				$200 < T \leq 400$							
T_2				$400 < T \leq 800$							
T_3				$800 < T \leq 1600$							
T_4				$1600 < T \leq 3200$							
T_5				$3200 < T \leq 6300$							
T_6				$6300 < T \leq 12500$							
T_7				$12500 < T \leq 25000$							
T_8				$25000 < T \leq 50000$							
T_9				$T > 50000$							
Définition des variables											
Variable				Définition							
T				Durée totale d'utilisation en heures							
Classes de spectres de sollicitation											
Classe de spectre d'utilisation				Condition							
L1				$k_m \leq 0,125$							
L2				$0,125 < k_m \leq 0,250$							
L3				$0,250 < k_m \leq 0,500$							
L4				$0,500 < k_m \leq 1,000$							
Définition du spectre de sollicitation											
Définition						Commentaire					
$k_m = \sum_{i=1}^r \left(\frac{S_i}{S_{\max}} \right)^3 \frac{t_i}{T}$						<p> k_m : Spectre de sollicitation S_i : Sollicitation i S_{\max} : Sollicitation maximale t_i : Durée de la sollicitation i T : Temps total d'utilisation </p> <p>Le spectre de sollicitation caractérise les sollicitations qui agissent sur un mécanisme pendant la durée totale de son utilisation.</p>					
Éléments											
Les éléments de charpente ou de mécanisme sont classés en 8 groupes.											
Groupe d'éléments											
	B 0	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	B 7	B 8	B 9	B 10
P ₁	E_1	E_1	E_1	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
P ₂	E_1	E_1	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_8
P ₃	E_1	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_8	E_8
P ₄	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_8	E_8	E_8

Définition des variables	
Variable	Définition
E_i	Groupe d'éléments
B_i	Classe d'utilisation
P_i	Classe de spectre de contrainte
Classes d'utilisation	
Classe utilisation	Nombre de cycles de contrainte n
B_0	$n \leq 16000$
B_1	$16000 < n \leq 32000$
B_2	$32000 < n \leq 63000$
B_3	$63000 < n \leq 125000$
B_4	$125000 < n \leq 250000$
B_5	$250000 < n \leq 500000$
B_6	$500000 < n \leq 1000000$
B_7	$1000000 < n \leq 2000000$
B_8	$2000000 < n \leq 4000000$
B_9	$4000000 < n \leq 8000000$
B_{10}	$8000000 < n$
Facteur de spectre de contrainte	
Définition	
$k_{sp} = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \right)^c \frac{n_i}{n_{max}}$ <p> k_{sp} : Facteur de spectre de contrainte σ_i : Contrainte de niveau i n_i : Nombre de cycles pour la contrainte de niveau i σ_{max} : Contrainte maximale n_{max} : Nombre de cycles total c : Pente de la courbe de Wöhler </p>	
Classes de spectre de contrainte	
Classe de spectre de contrainte	Condition
P_1	$k_{sp} \leq 0,125$
P_2	$0,125 < k_{sp} \leq 0,250$
P_3	$0,250 < k_{sp} \leq 0,500$
P_4	$0,500 < k_{sp} \leq 0,100$

Chargement							
Combinaisons pour la charpente							
Trois combinaisons principales de charges sont à considérer sur les structures. Pour des structures abritées, le cas II avec vent n'est pas nécessaire.							
Combinaisons de charges							
Combinaison		Commentaire					
Cas I		La combinaison I correspond à l'utilisation en service sans effet du vent.					
Cas II		Le cas II correspond au fonctionnement en service avec effet du vent.					
Cas III		Ces combinaisons correspondent aux charges exceptionnelles : Les charges dues au poids propre et au vent maximal, les charges dues au poids propre, au service et au tamponnement, les charges dues au poids propre et aux essais.					
Définition de combinaisons							
Combinaison		Définition					
cas I		$\gamma_c(S_G + \psi S_L + S_H)$ <p> γ_c : Coefficient de majoration S_G : Charges dues au poids propre S_L : Charges de service ψ : Coefficient dynamique S_H : Les deux charges horizontales les plus défavorables hormis le tamponnement </p>					
Cas II		$\gamma_c(S_G + \psi S_L + S_H + S_W)$ <p> S_W : Charge due au vent </p>					
cas III		$S_G + S_{Wmax}$ $S_G + S_L + S_T$ $S_G + \max(\psi \rho_1 S_L, \rho_2 S_L)$ <p> S_T : Sollicitations de tamponnement ρ_1 : Coefficient de majoration de la charge normale pour essai dynamique ρ_2 : Coefficient de majoration de la charge normale pour essai statique </p>					
Coefficients de chargement							
Des coefficients dynamiques et de majoration des charges sont définis pour tenir compte des effets d'amplification dynamiques, des aléas de charge et des essais.							
Coefficient de majoration γ_c en fonction du groupe d'engin							
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
1,00	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20

Coefficient dynamique ψ	
Définition	Commentaire
$\psi = \min[1,6 ; \max(1 + \zeta V_L ; 1,15)]$ <p>ψ : Coefficient dynamique ζ : Coefficient V_L : Vitesse de levage en $\frac{m}{s}$</p>	<p>Le coefficient dynamique varie entre 1,15 et 1,6 pour une vitesse de levage qui varie entre 0,2 et 1 $\frac{m}{s}$. Ce coefficient tient compte des impulsions dynamiques au début et à la fin du lever de charge. Ce phénomène peut être atténué par des dispositifs spéciaux. Le coefficient ζ dépend du type d'engin de levage. Pour un pont roulant, sa valeur est:</p> $\zeta = 0,6$
Coefficient de charges d'essai	
Coefficient	Commentaire
$\rho_1 = 1,2$ <p>ρ_1 : Coefficient d'essai dynamique</p>	L'appareil doit être essayé avec une surcharge en effectuant tous les mouvements.
$\rho_2 = 1,4$ <p>ρ_2 : Coefficient d'essai statique</p>	L'appareil doit être essayé avec une surcharge sans effectuer de mouvements. Une charge nominale est légèrement soulevée puis des masses additionnelles sont progressivement ajoutées avec précaution.
Charges sur la charpente	
<p>Il est nécessaire de déterminer par des calculs mécaniques les sollicitations dans la charpente dues aux charges statiques, aux mouvements verticaux, aux mouvements horizontaux et aux charges climatiques.</p>	
Définition	
Charge	Description
Charge de service	Il s'agit du poids de la charge utile plus le poids des accessoires soulevés tels que les mouffes, les crochets, les palonniers par exemple.
Poids propre	Il s'agit du poids des composants et des accessoires sans la charge de service.
Charges verticales	
Charge	Commentaire
Soulèvement de la charge de service	Le soulèvement de la charge de service induit des sollicitations dans les éléments.
Accélération du levage	Les accélérations ou freinage du mouvement de levage entraînent des sollicitations dans les éléments. Le coefficient dynamique tient compte de cet effet.
Choc sur rail	Le passage des galets sur des trous ou des irrégularités du rail entraîne des accélérations verticales et des sollicitations. Cet effet est négligé pour des rails en bon état mais très important pour des rails usagers. La norme européenne EN 13001 permet de tenir compte de ce phénomène.
Charges horizontales	
Charge	Commentaire
Accélérations	Les accélérations ou les freinages lors des mouvements horizontaux entraînent des sollicitations sur les éléments. Les charges sont généralement transmises par les galets de roulement.

Charges horizontales	
Charge	Commentaire
Marche en crabe	Le roulement des galets sur des rails parallèles entraîne un couple d'axe vertical sur l'engin à cause des tolérances d'alignement des galets et des rails. La FEM permet d'estimer ce couple en fonction des réactions aux galets. La norme européenne EN 13001 permet d'estimer plus précisément cet effet.
Tamponnement	Le déplacement jusqu'en fin de course de l'appareil peut engendrer un choc de tamponnement. Il est nécessaire de vérifier les sollicitations au tamponnement. Les oscillations ou le choc de la charge de service ne sont généralement pas cumulés avec le tamponnement sauf si la liaison de la charge à l'appareil est rigide.

Combinaisons pour les mécanismes

La vérification de la résistance des mécanismes sous l'effet de la combinaison de charges doit être réalisée.

Combinaisons

Combinaison	Description
Cas I	$\gamma_m(S_{MG} + S_{ML} + S_{MF} + S_{MA})$ $\gamma_m(S_{RG} + S_{RL} + S_{RA})$
Cas II	$\gamma_m(S_{MG} + S_{ML} + S_{MF} + S_{MA} + S_{MW8})$ $\gamma_m(S_{MG} + S_{ML} + S_{MF} + S_{MW25})$ $\gamma_m(S_{RG} + S_{RL} + S_{RA} + S_{RW25})$ <p>S_{MW25}, S_{RW25} : Sollicitations pour un vent de $250 \frac{N}{m^2}$</p> <p>S_{M8} : Sollicitations pour un vent de $80 \frac{N}{m^2}$</p>
Cas III	$1,6(S_{ML} + S_{MF})$ S_{Mcmax} $1,6S_{MmaxII}$ <p>S_{Mcmax} : Sollicitation pour le couple maximal du moteur ou du frein effectivement transmissible</p> <p>S_{MmaxII} : Sollicitation maximale pour le cas de charge II</p>

Charges sur les mécanismes

Les mécanismes qui transmettent les mouvements sont soumis à des sollicitations et leur résistance doit être vérifiée.

Types de sollicitations sur les mécanismes

Notation	Description
S_M	Il s'agit des sollicitations qui dépendent des couples exercés par les moteurs ou les freins sur les mécanismes.
S_R	Il s'agit des sollicitations qui sont dues aux réactions à la liaison des pièces mécaniques.