

Eurocode 1 – Actions sur les structures - Partie 3: Actions induites par les appareils de levage et les machines: 2006 et prNBN EN 1991-3 ANB:2009 (F)

Eurocode 3 – Calcul des structures en acier - Partie 6: Chemins de roulement (+ AC:2009):2007 et prNBN EN 1993-6 ANB:2009 (F)

Eugène Piraprez¹, Luc Schueremans²

¹: Steel Solutions, Rue Zénobe Gramme 44, B-4280 Hannut
info@steelsolutions.be

²: KULeuven, departement burgerlijke bouwkunde, kasteelpark Arenberg 40, luc.schueremans@bwk.kuleuven.be

Avec les remerciements à: RWTH-Aachen – institut und Lehrstuhl für Stahlbau Leithmetallbau: G. Sedlacek, R. Schneider, Chr. Müller, S. Höhler, J. Stötzel

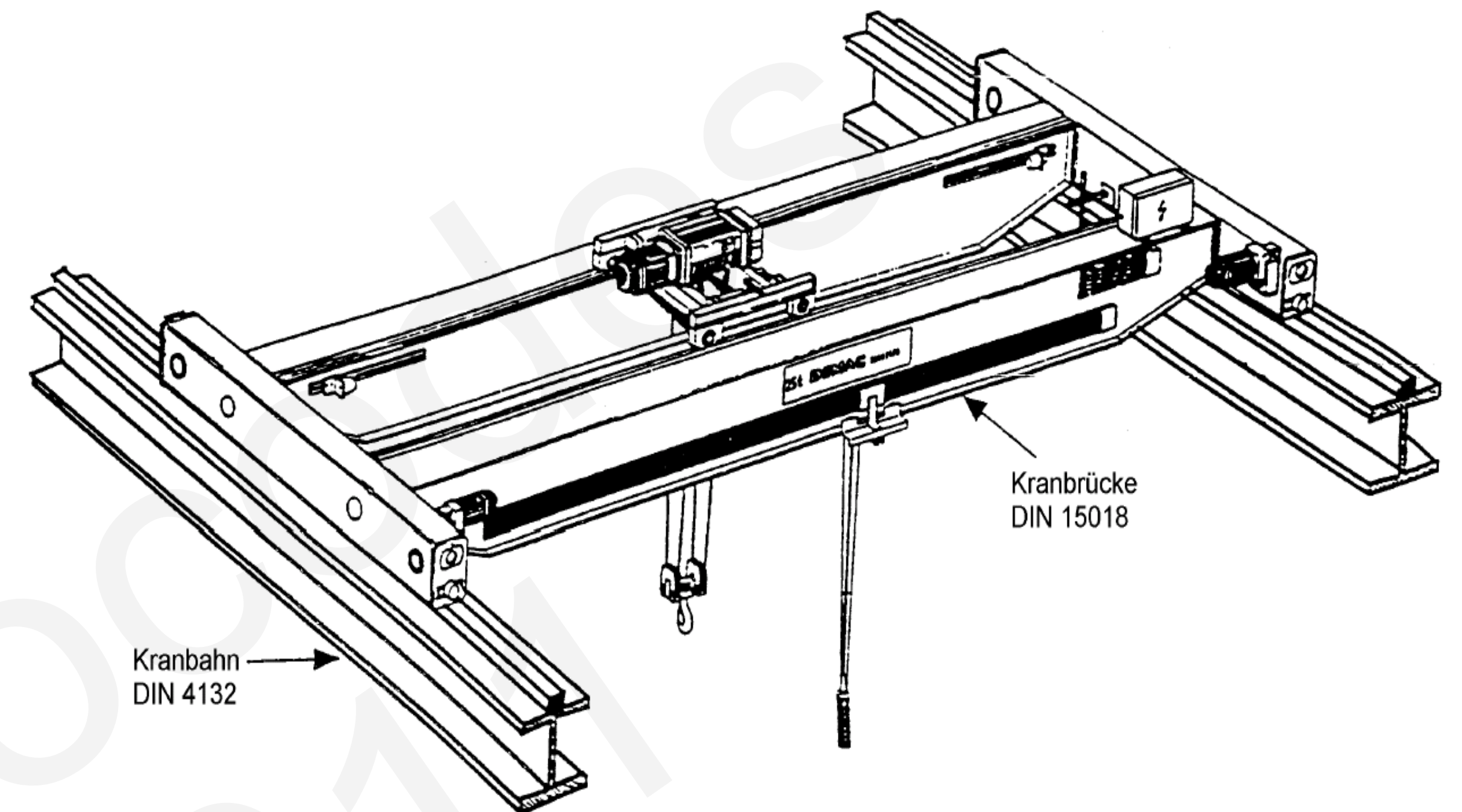


**COBO
MEDIA**



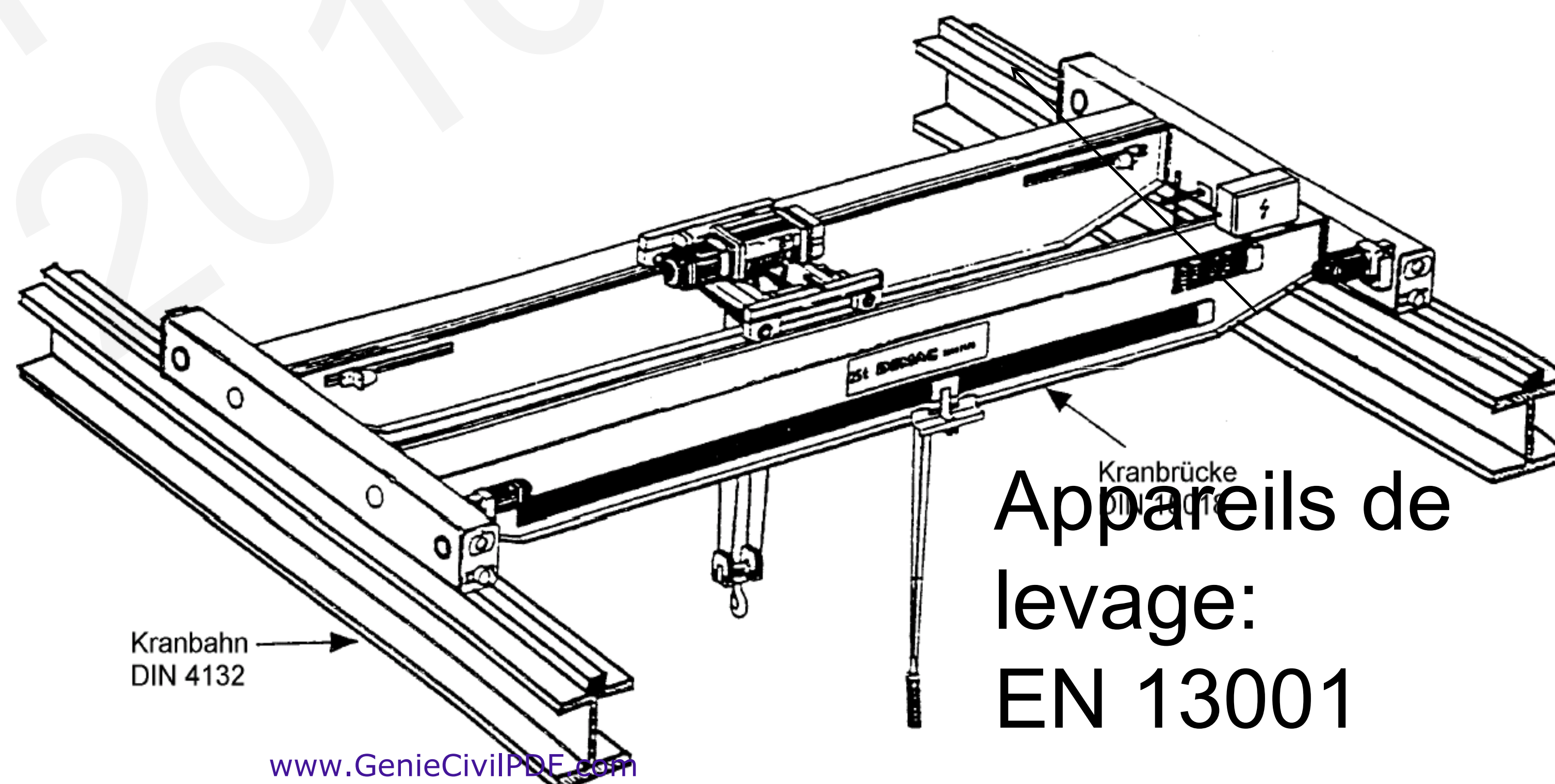
Contenu

- Références normatives EN
- Domaine d'application – principes de base
- Sollicitations
- Dimensionnement
- Vérification de la stabilité
- Fatigue
- Exemple de calcul



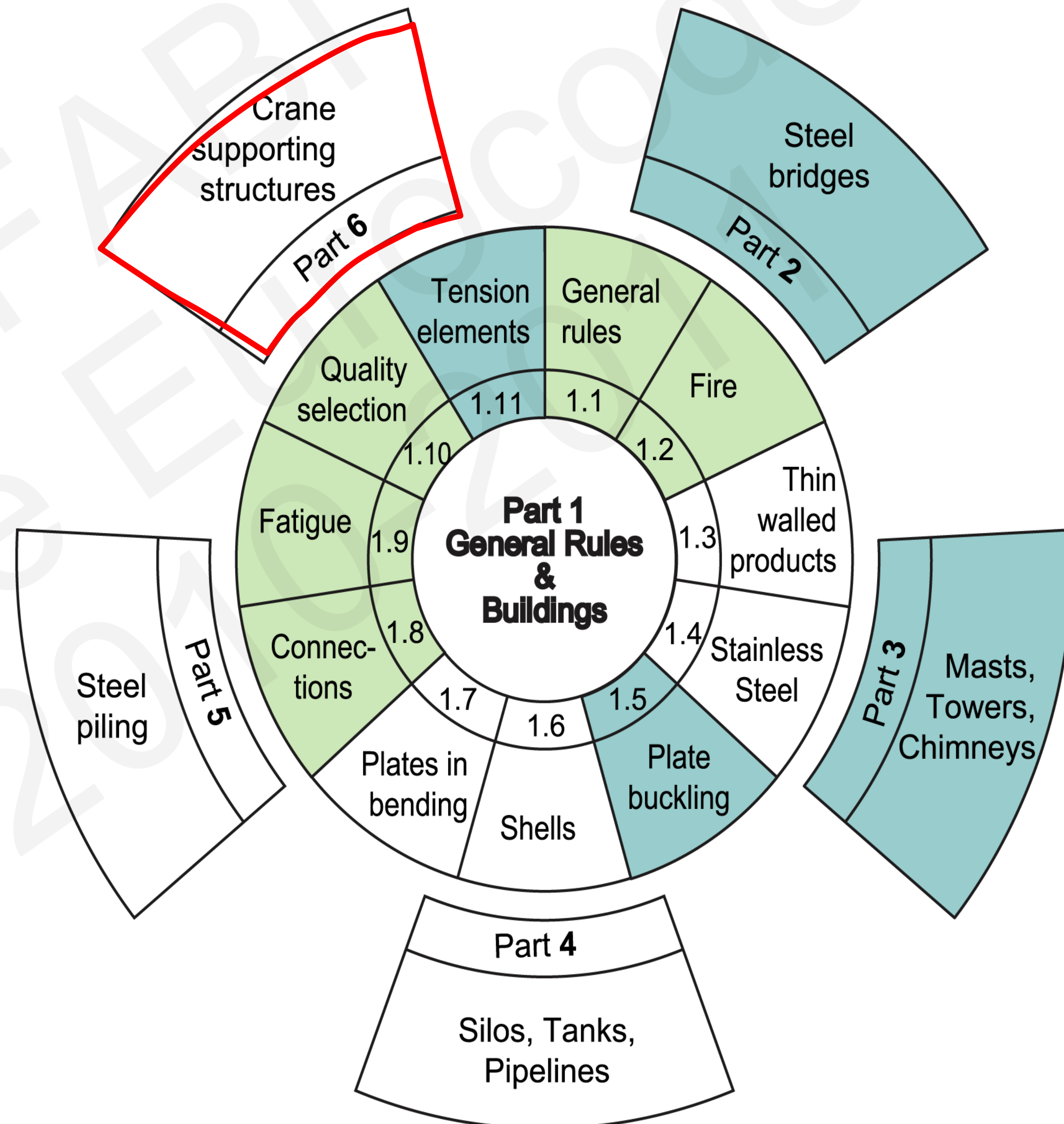
Cadre normatif

- EN 1990 Eurocode: Bases de calcul des structures
- EN 13001-1 Appareils de levage – conception générale
 - Part 1: Principes et prescriptions
- EN 13001-2 Appareils de levage – conception générale
 - Part 2: Effets des charges
- EN 1993-1-9 Calcul des structures en acier – Partie 1-9: Fatigue
- EN 1991-3: Actions sur les structures – Partie 3: Actions induites par les appareils de levage et les machines
- EN 1993-6: Calcul des structures en acier - Partie 6: Chemins de roulement



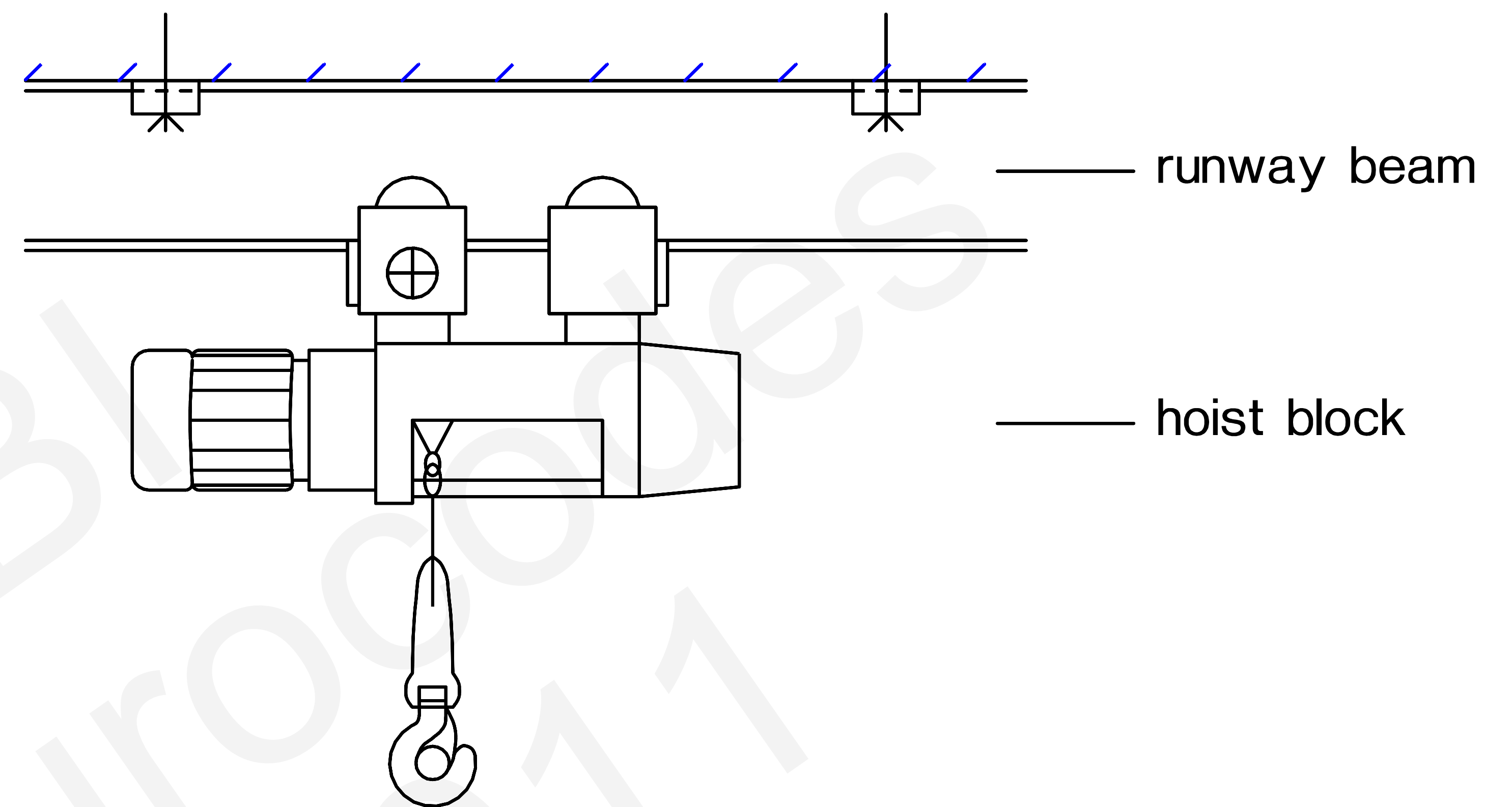
Cadre normatif

- **EN 1991-3** Actions sur les structures – Partie 3: Actions induites par les appareils de levage et les machines
- **EN 1993-6** Calcul des structures en acier - Partie 6: Chemins de roulement



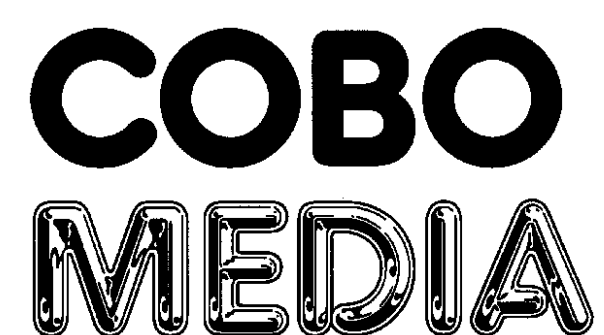
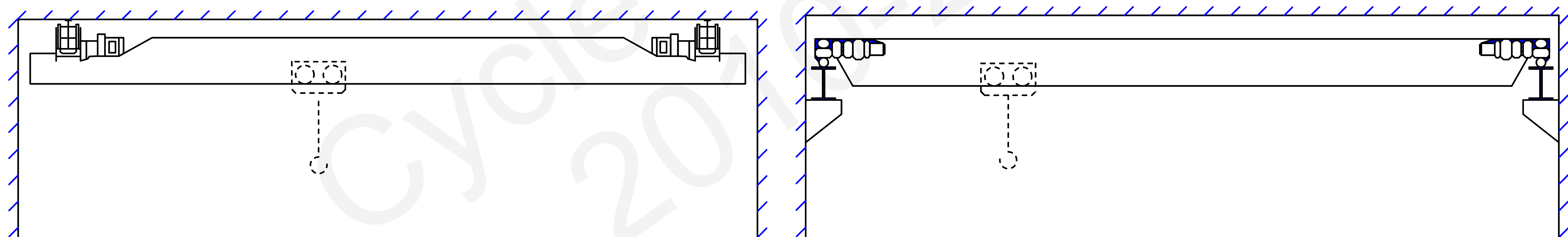
Types de ponts roulants

Poutre de roulement pour palan
avec chariot monorail



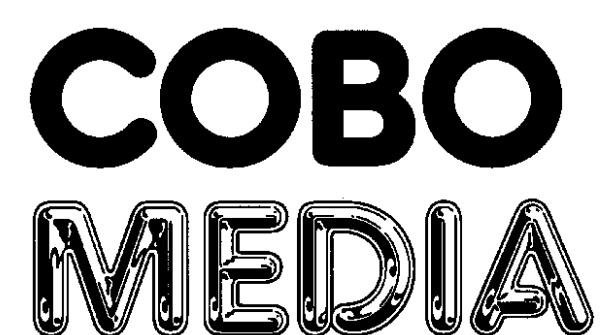
Pont roulant

- suspendu avec palan avec chariot - posé avec palan avec chariot



Classification des actions

Actions variables			Actions accidentelles
Verticales	Horizontales	Verticale	
<ul style="list-style-type: none"> • Poids propre • Masse à lever 	<ul style="list-style-type: none"> • Forces d'entraînement • Marche en crabe • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Charge d'essai 	<ul style="list-style-type: none"> • Forces de tamponnement
Dynamiques ($\varphi_1, \dots, \varphi_6$)			Quasi-statiques
$F_{\varphi,k} = \varphi_i F_k$			
$(\varphi_1, \dots, \varphi_4)$	(φ_5)	(φ_6)	(φ_7)



Groupes des charges

		Symbole	Paragraphe	Groupes de charges									
				Etat limite ultime							Charge d'essai	Acci dentelle	
				1	2	3	4	5	6	7		8	9
1	Poids propre de l'appareil de levage	Q_c	2.6	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1
2	Masse à lever	Q_h	2.6	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	$\eta^{1)}$	-	1	1
3	Accélération de la poutre du pont	H_L, H_T	2.7	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-	-	φ_5	-	-
4	Marche en crabe de la poutre du pont	H_S	2.7	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Accélération ou freinage du chariot ou du palan avec chariot	H_{T3}	2.7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6	Vent en service	F_W	Annexe A	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7	Charge d'essai	Q_T	2.10	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-
8	Force de tamponnement	H_B	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-
9	Force de basculement	H_{TA}	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

NOTE Pour le vent hors service, voir l'annexe A.

^a η est la part relative de la masse à lever qui reste après avoir enlevé la charge utile, mais qui n'est pas incluse dans le poids propre de l'appareil de levage.

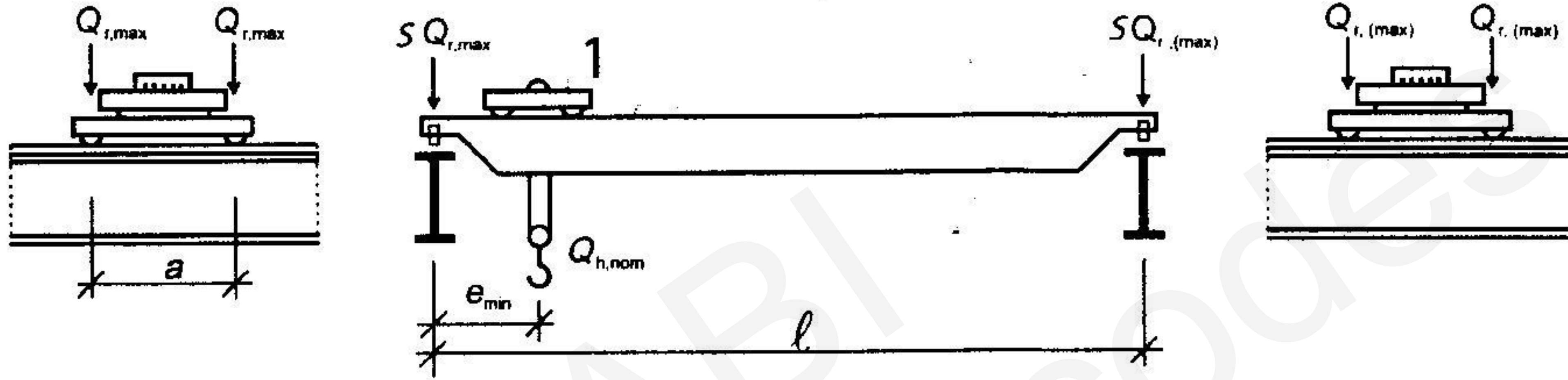
Coefficients dynamiques

Coefficients dynamiques	Effets à prendre en compte	A appliquer à
φ_1	excitation de la structure de l'appareil de levage due au décollage de la masse à lever du sol.	poids propre de l'appareil de levage
φ_2 ou φ_3	effets dynamiques du transfert de la masse à lever du sol à l'appareil de levage effets dynamiques d'une libération brutale de la charge utile, par exemple en cas d'utilisation d'un grappin ou d'un aimant	masse à lever
φ_4	effets dynamiques induits par le déplacement de l'appareil de levage sur des rails ou des chemins de roulement	poids propre de l'appareil de levage et de la masse à lever
φ_5	effets dynamiques provoqués par des forces d'entraînement	forces d'entraînement
φ_6	effets dynamiques d'une charge d'essai mue par les systèmes d'entraînement suivant le mode d'utilisation de l'appareil de levage	charge d'essai
φ_7	effets élastiques dynamiques de l'impact sur les tampons	charges des tampons

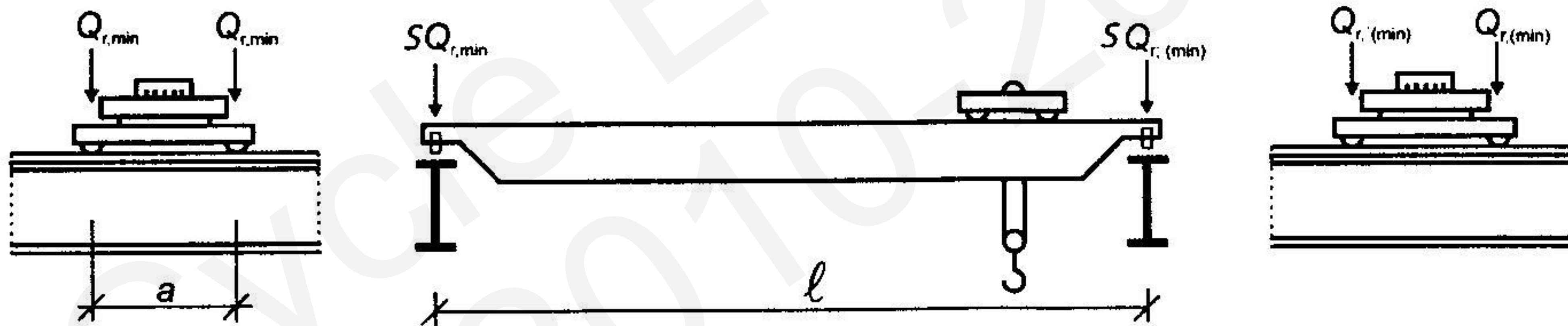
Charges verticales – coefficients dynamiques

Valeurs des coefficients dynamiques	
φ_1	$0,9 < \varphi_1 < 1,1$ Les deux valeurs 1,1 et 0,9 reflètent les valeurs supérieure et inférieure des impulsions vibratoires.
φ_2	$\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 \times v_h$ v_h - vitesse constante de levage en [m/s] $\varphi_{2,\min}$ et β_2 voir Tableau 2.5
φ_3	$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m} (1 + \beta_3)$ où Δm est la partie libérée ou tombée de la masse de levage m est la masse de levage totale et $\beta_3 = 0,5$ pour les appareils de levage équipés de grappins ou de dispositifs similaires à largage non instantané $\beta_3 = 1,0$ pour les appareils de levage équipés d'aimants ou de dispositifs similaires à largage rapide
φ_4	$\varphi_4 = 1,0$ à condition de respecter les tolérances prescrites dans l'EN 1993-6 pour les rails.
NOTE Si les tolérances applicables aux rails prescrites dans l'EN 1993-6 ne sont pas respectées, le coefficient dynamique φ_4 peut être déterminé à l'aide du modèle fourni par l'EN 13001-2.	

Charges verticales

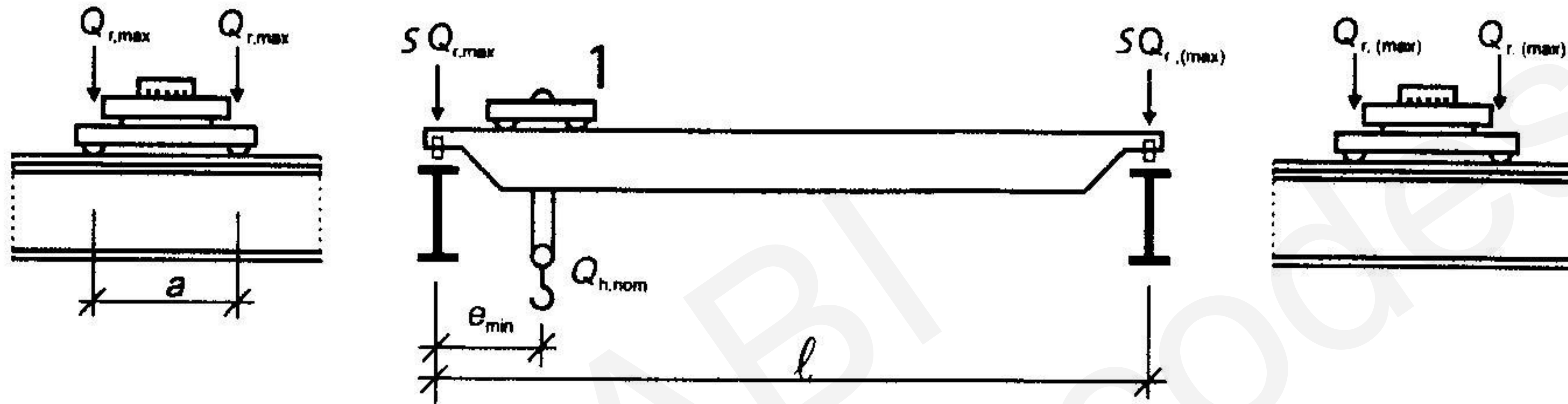


a) Position de l'appareil de levage en charge pour obtenir le chargement maximal de la poutre de roulement



b) Position de l'appareil de levage à vide pour obtenir le chargement minimal de la poutre de roulement

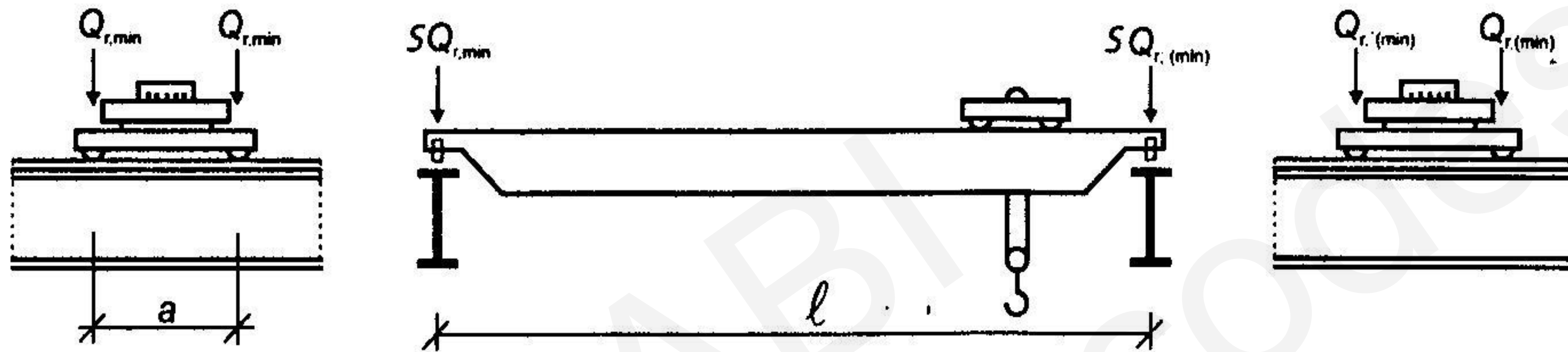
Charges verticales



a) Position de l'appareil de levage en charge pour obtenir le chargement maximal de la poutre de roulement

- $Q_{r,max}$ est la charge maximale par galet de l'appareil de levage en charge
- $Q_{r,(max)}$ est la charge d'accompagnement par galet de l'appareil de levage en charge
- $\sum Q_{r,max}$ est la somme des charges maximales $Q_{r,max}$ par chemin de roulement de l'appareil de levage en charge
- $\sum Q_{r,(max)}$ est la somme des charges maximales d'accompagnement $Q_{r,(max)}$ par chemin de roulement de l'appareil de levage en charge
- $Q_{h,nom}$ est la masse à lever nominale

Charges verticales



b) Position de l'appareil de levage à vide pour obtenir le chargement minimal de la poutre de roulement

- $Q_{r,min}$ est la charge minimale par galet de l'appareil de levage à vide
- $Q_{r,(min)}$ est la charge d'accompagnement par galet de l'appareil de levage à vide
- $\sum Q_{r,min}$ est la somme des charges minimales $Q_{r,min}$ par chemin de roulement de l'appareil de levage à vide
- $\sum Q_{r,(min)}$ est la somme des charges minimales d'accompagnement $Q_{r,(min)}$ par chemin de roulement de l'appareil de levage à vide
- $Q_{h,nom}$ est la masse à lever nominale

Exemple de calcul

- $L=15.00\text{m}$ – portée
- $a=2.50\text{m}$ – écartement des galets
- $e_{\min} = 0.00\text{m}$
- Masse à lever nominale: $Q_{h,\text{nom}} = 100\text{ kN}$
- Poids propre du pont: $Q_{c1} = 60\text{ kN}$
- Poids propre du chariot: $Q_{c2} = 10\text{ kN}$
- Classe de levage: HC3 – annexe B

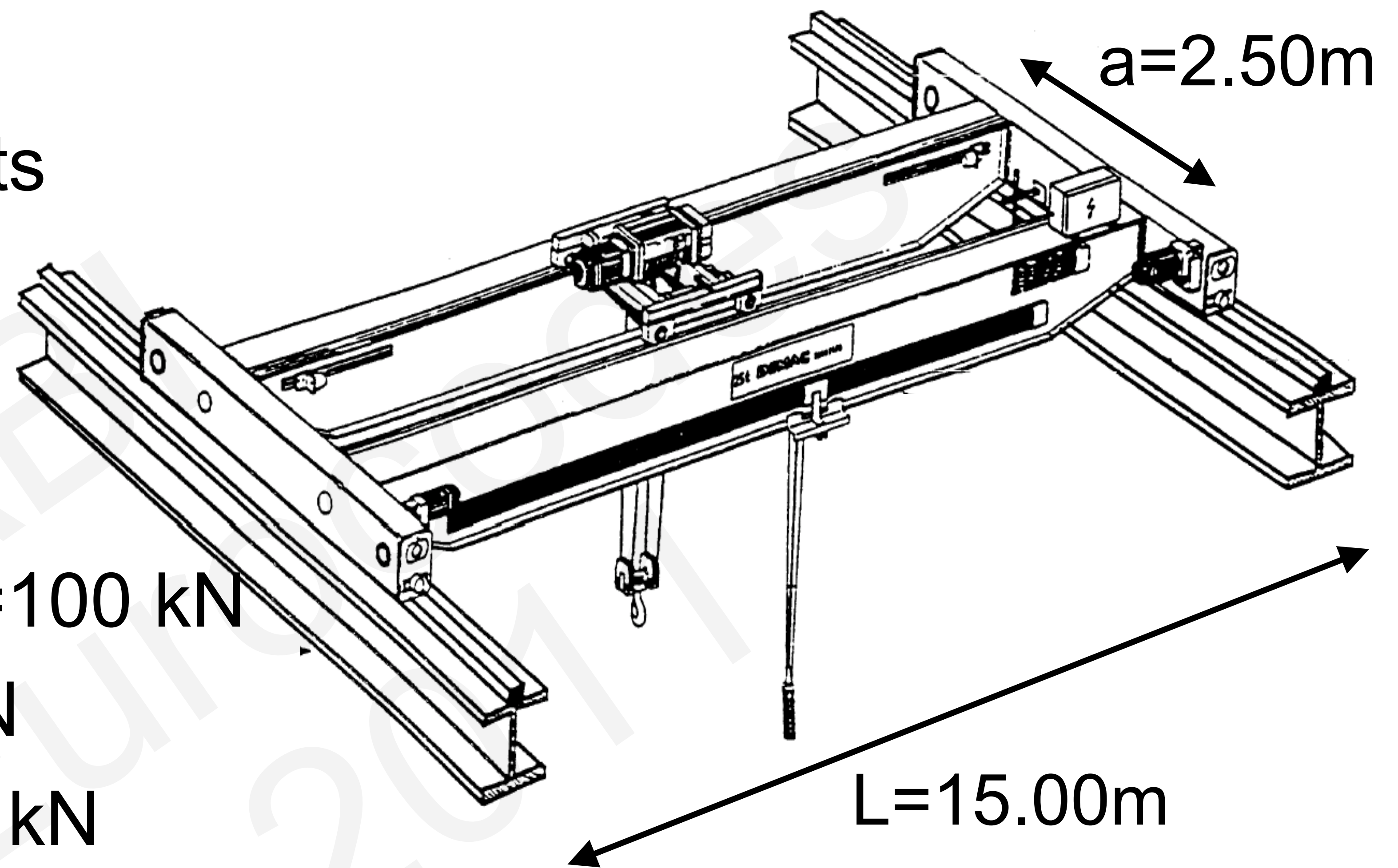


Tableau 2.5 — Valeurs de β_2 et $\varphi_{2,\min}$

Classe de levage de l'appareil	β_2	$\varphi_{2,\min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

NOTE Les appareils de levage sont répartis dans les classes de levage HC1 à HC4 pour tenir compte des effets dynamiques du transfert de la charge du sol à l'appareil de levage. La sélection dépend du type particulier de l'appareil de levage, voir les recommandations de l'annexe B.

Charges verticales : coefficients dynamiques

Valeurs des coefficients dynamiques	
φ_1	$0,9 < \varphi_1 < 1,1$ Les deux valeurs 1,1 et 0,9 reflètent les valeurs supérieure et inférieure des impulsions vibratoires.
φ_2	$\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 \times v_h$ v_h - vitesse constante de levage en [m/s] $\varphi_{2,\min}$ et β_2 voir Tableau 2.5
φ_3	$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m} (1 + \beta_3)$ où Δm est la partie libérée ou tombée de la masse de levage m est la masse de levage totale et $\beta_3 = 0,5$ pour les appareils de levage équipés de grappins ou de dispositifs similaires à largage non instantané $\beta_3 = 1,0$ pour les appareils de levage équipés d'aimants ou de dispositifs similaires à largage rapide
φ_4	$\varphi_4 = 1,0$ à condition de respecter les tolérances prescrites dans l'EN 1993-6 pour les rails.
NOTE Si les tolérances applicables aux rails prescrites dans l'EN 1993-6 ne sont pas respectées, le coefficient dynamique φ_4 peut être déterminé à l'aide du modèle fourni par l'EN 13001-2.	

Charges verticales

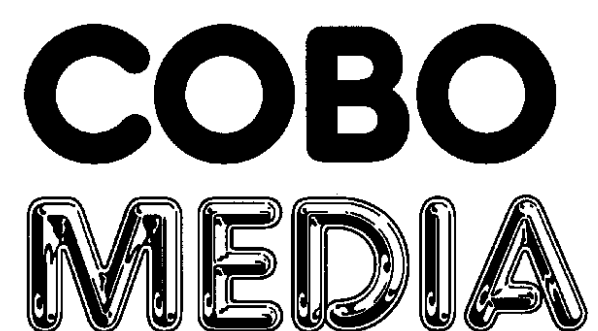
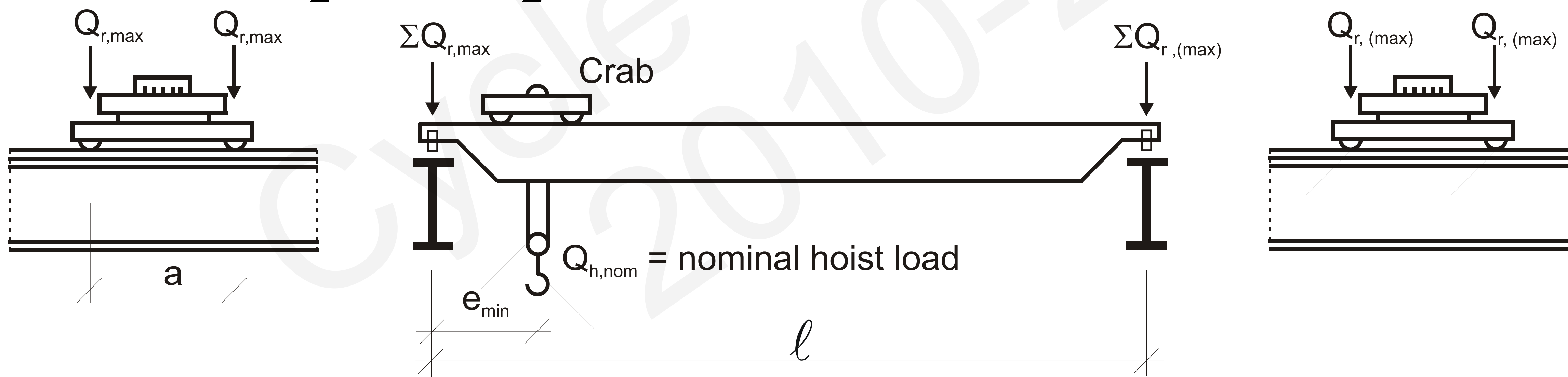
$\varphi_1 = 1,1$; $\varphi_2 = 1,2$ – avec masse à lever $Q_{h,k}=100$ kN – $Q_{r,max}$:

$$\sum Q_{r,max} = \varphi_1 \left[\frac{Q_{c1}}{2} + Q_{c2} \left(\frac{l - e_{min}}{l} \right) \right] + \varphi_2 Q_h \left(\frac{l - e_{min}}{l} \right) = 1.1 \left[\frac{60}{2} + 10 \left(\frac{15 - 0}{15} \right) \right] + 1.2 \times 100 \left(\frac{15 - 0}{15} \right) = 164 kN$$

$$\sum Q_{r,(max)} = \varphi_1 \left[\frac{Q_{c1}}{2} + Q_{c2} \left(\frac{e_{min}}{l} \right) \right] + \varphi_2 Q_h \left(\frac{e_{min}}{l} \right) = 1.1 \left[\frac{60}{2} + 10 \left(\frac{0}{15} \right) \right] + 1.2 \times 100 \left(\frac{0}{15} \right) = 33 kN$$

$$Q_{r,max} = \frac{\sum Q_{r,max}}{2} = \frac{164 kN}{2} = 88 kN$$

$$Q_{r,(max)} = \frac{\sum Q_{r,(max)}}{2} = \frac{33 kN}{2} = 16.5 kN$$



Charges verticales

$\varphi_1 = 1,1$: sans masse à lever – $Q_{r,min}$:

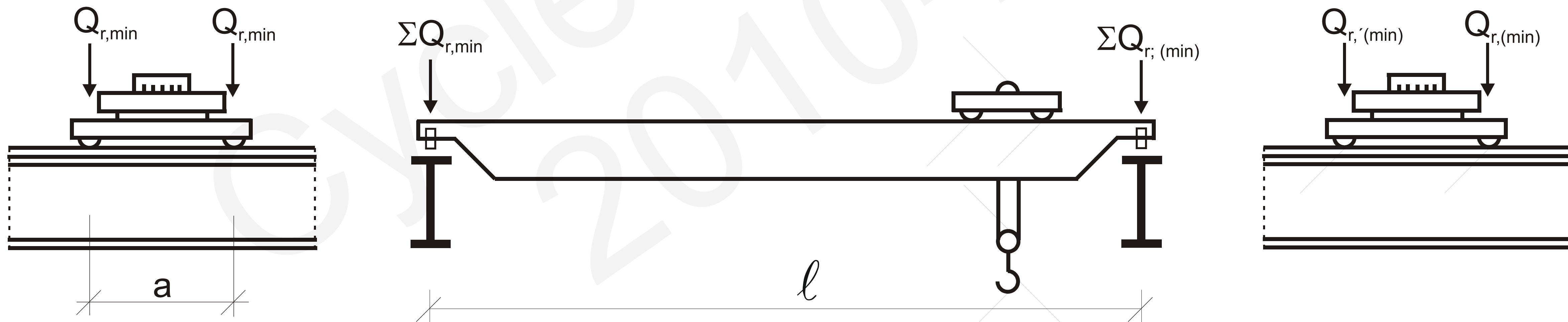
$$F_{\varphi,k} = \varphi_i F_k$$

$$\Rightarrow Q_{C1,\varphi,k} = 1,1 \cdot 60,0 = 66,0 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow Q_{C2,\varphi,k} = 1,1 \cdot 10,0 = 11,0 \text{ kN}$$

$$\sum Q_{r,(min)} = \frac{1}{2} \cdot 66,0 + 11,0 = 44,0 \text{ kN} \Rightarrow Q_{r,(min)} = 22,0 \text{ kN}$$

$$\sum Q_{r,min} = \frac{1}{2} \cdot 66,0 = 33,0 \text{ kN} \Rightarrow Q_{r,min} = 16,5 \text{ kN}$$

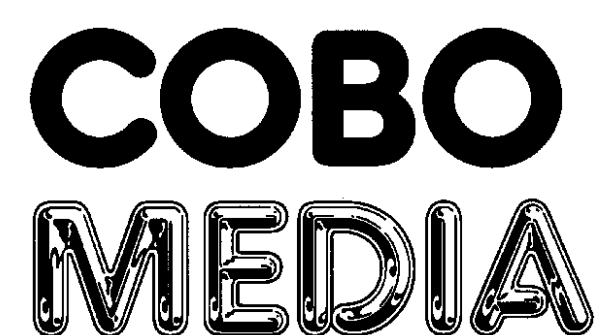


2.5.2.2 Forces horizontales

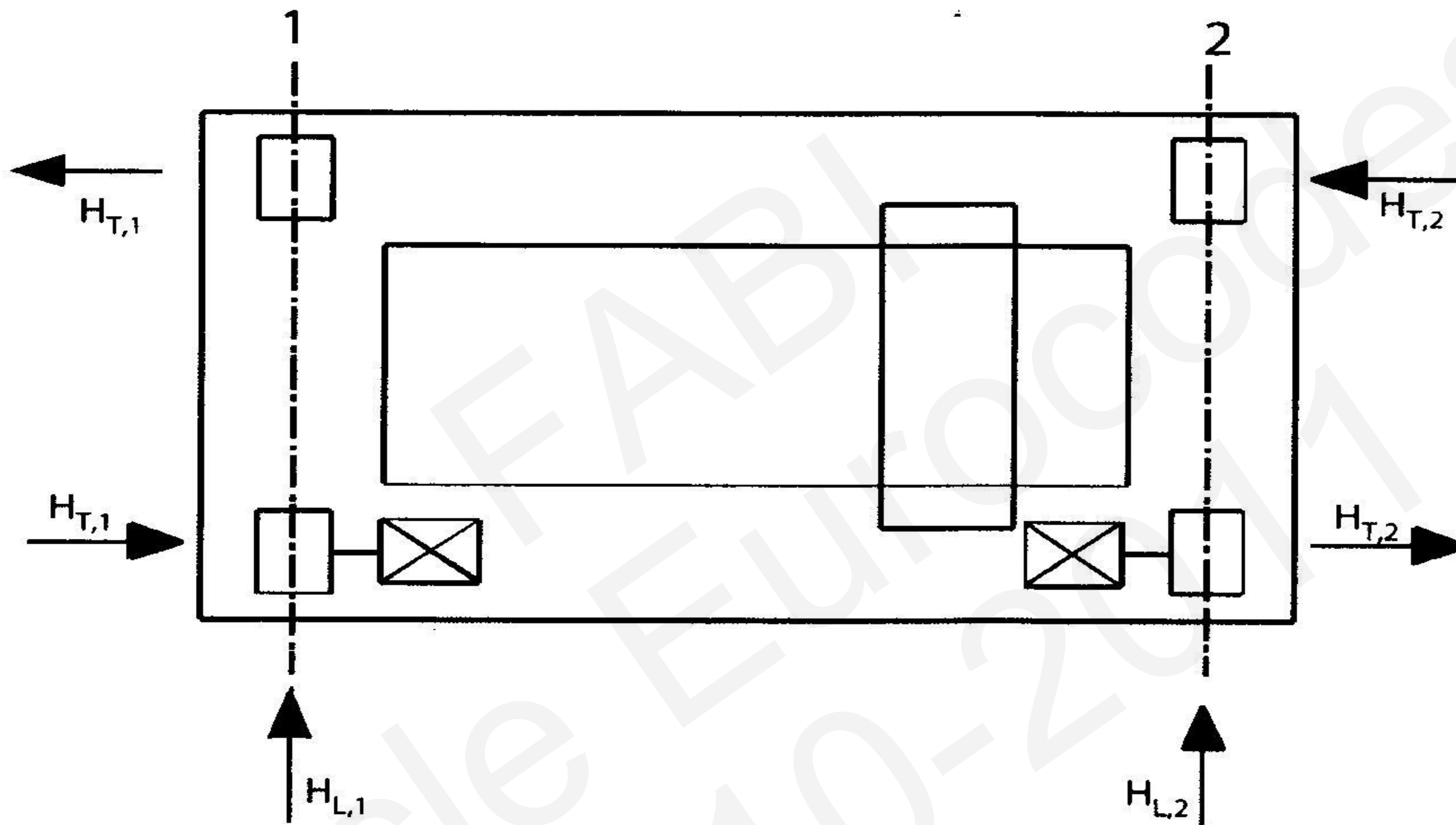
(1) Il convient de tenir compte des types suivants de forces horizontales induites par des ponts roulants :

- a) forces horizontales produites par les accélérations ou décélérations de l'appareil de levage lors de ses déplacements, voir 2.7.2 ;
- b) forces horizontales produites par les accélérations ou décélérations du chariot ou du chariot suspendu lors de ses déplacements sur la poutre du pont, voir 2.7.5 ;
- c) forces horizontales produites par la marche en crabe de l'appareil de levage, voir 2.7.4 ;
- d) forces de tamponnement liées aux déplacements de l'appareil de levage, voir 2.11.1 ;
- e) forces de tamponnement liées aux déplacements du chariot ou du chariot suspendu, voir 2.11.2.

(2) Sauf spécification contraire, il convient de ne considérer qu'un seul des cinq types de forces horizontales a) à e) énumérés en (1) dans un même groupe de composantes de charges simultanées des appareils de levage, voir Tableau 2.2.



Forces horizontales



Légende :
1 Rail $i = 1$
2 Rail $i = 2$

Figure 2.3 — Disposition des forces horizontales longitudinales et transversales exercées par les galets produites lors des accélérations et des décélérations

Forces horizontales produites lors des accélérations et des décélérations

Longitudinales:

$$H_{L,1} = H_{L,2} = \varphi_5 \cdot \frac{K}{n_r}$$

n_r : nombre de poutres de roulement

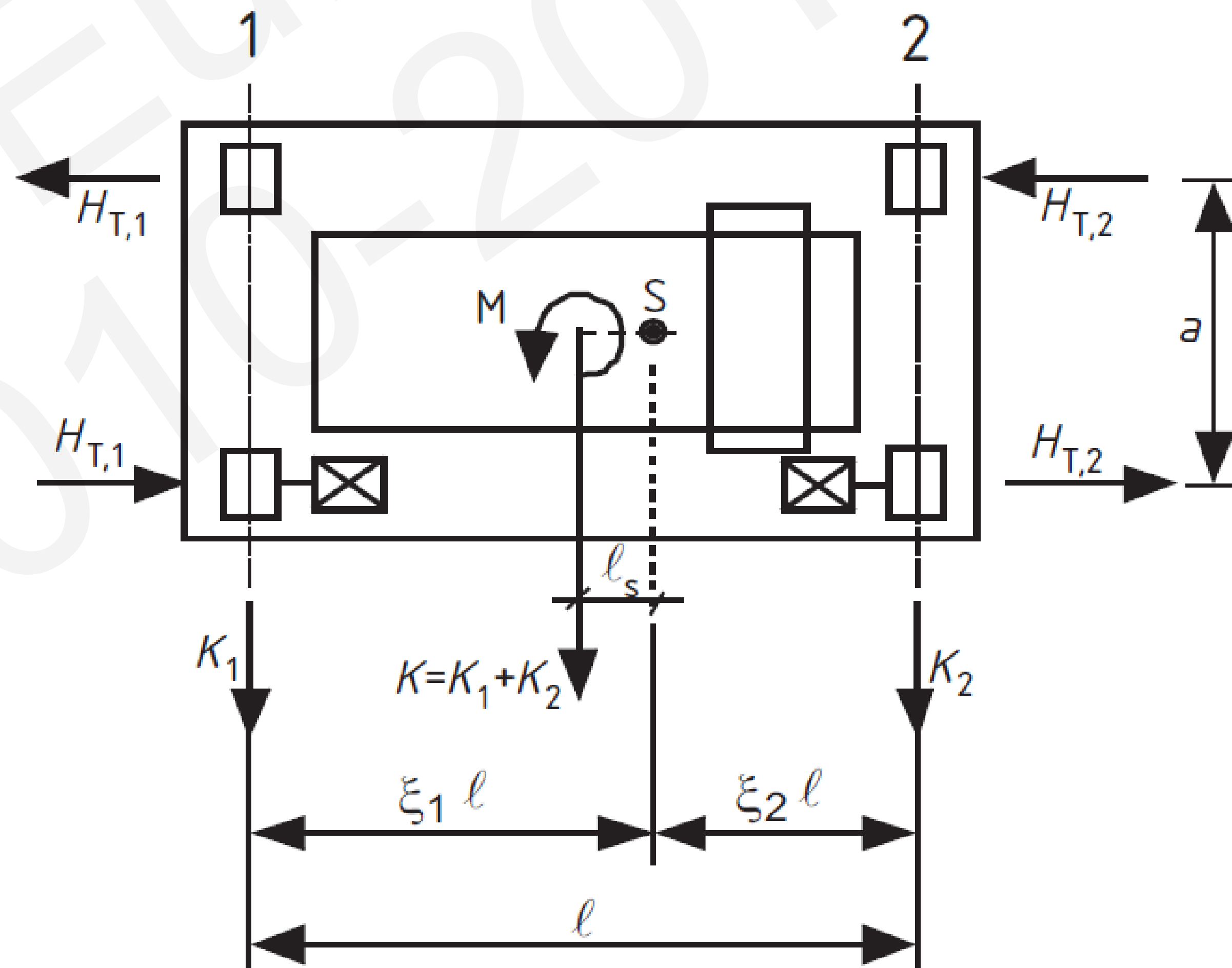
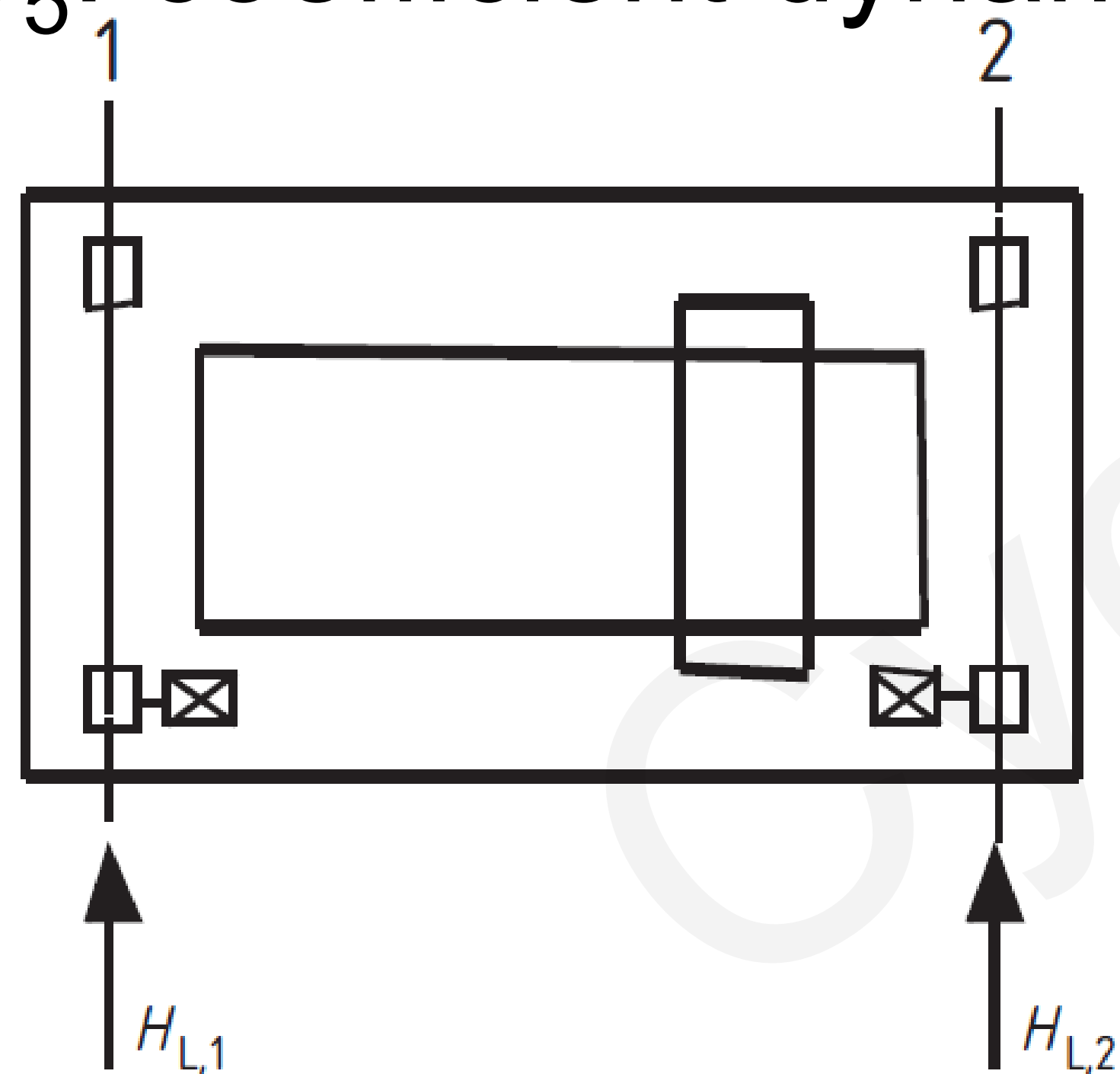
K : force d'entraînement

φ_5 : coefficient dynamique

Transversales:

$$H_{T,1} = \varphi_5 \cdot \xi_2 \cdot \frac{M}{a}$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \cdot \xi_1 \cdot \frac{M}{a}$$



Exemple de calcul

K: force d'entraînement (par galet)

$n_r=2$ nombre de poutres de roulement

$\varphi_5=1.5$ coefficient dynamique

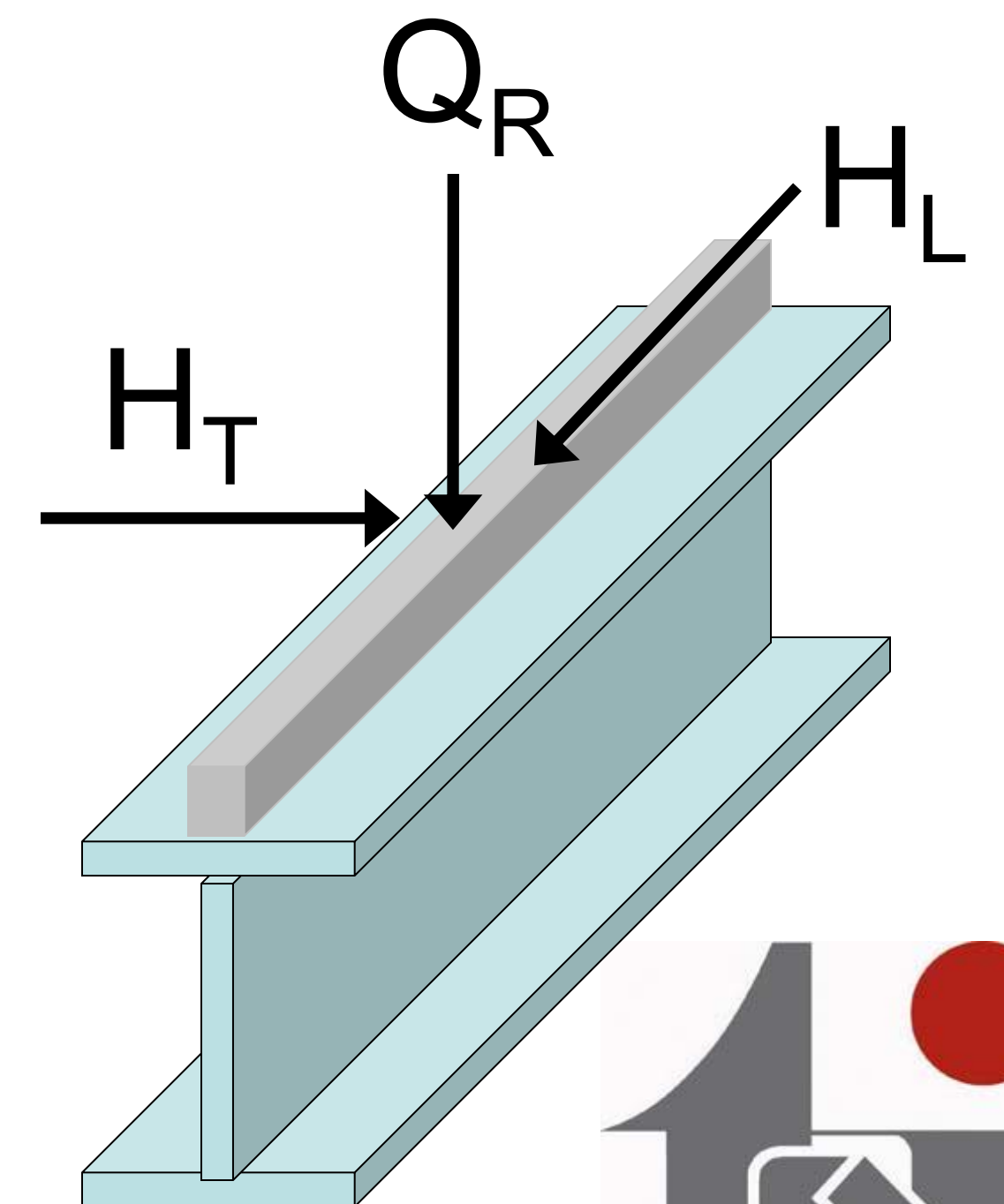
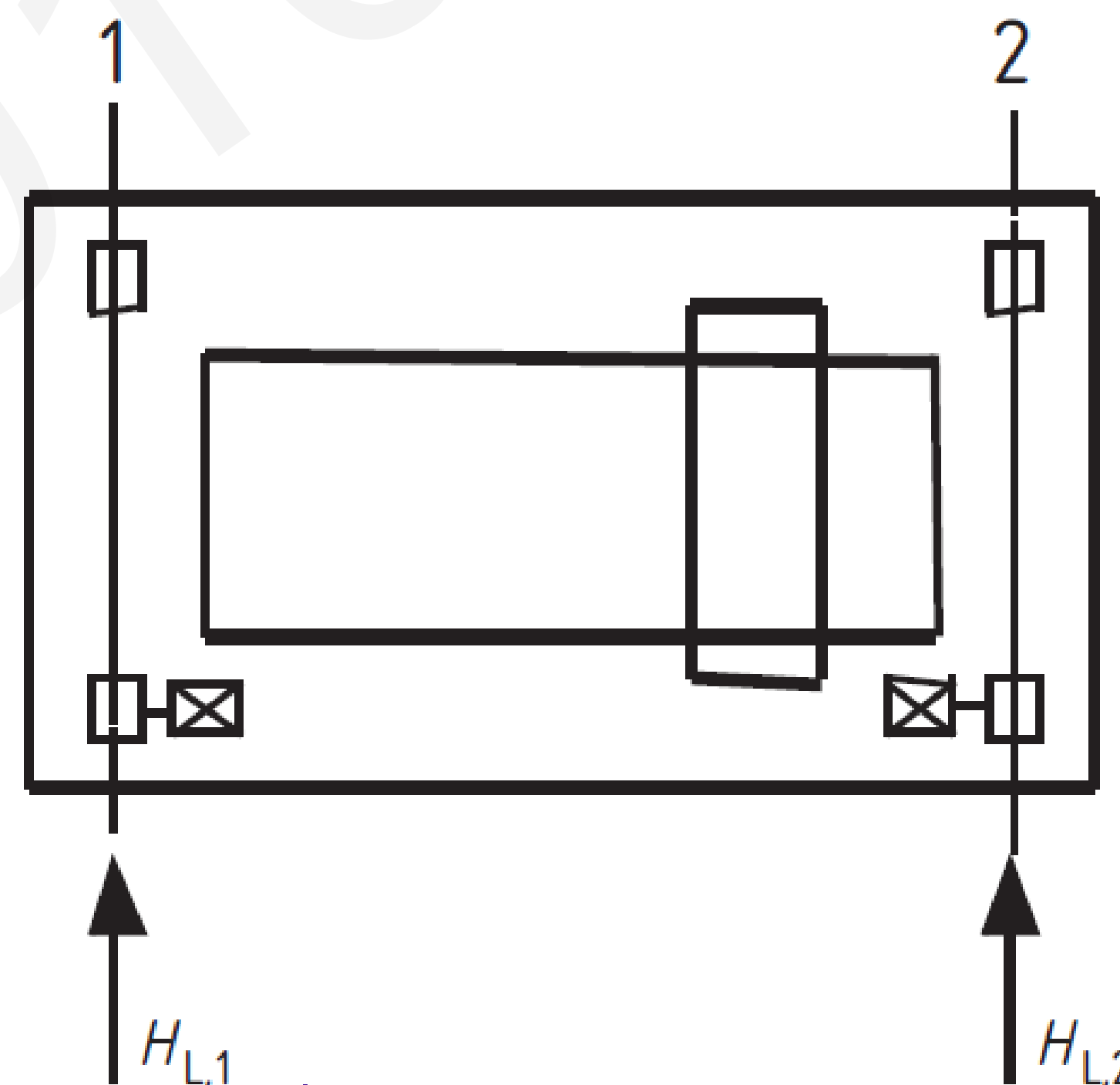
$m_w=2$; nombre de systèmes d'entraînement à un galet

$\mu=0.2$ (contact acier-acier)

$$\sum Q_{r,\min}^* = m_w \cdot Q_{r,\min} = 2 \cdot 15,0 = 30,0 \text{ kN}$$

$$K = K_1 + K_2 = \mu \cdot \sum Q_{r,\min}^* = 0,2 \cdot 30,0 = 6,0 \text{ kN}$$

$$H_{L,1} = H_{L,2} = \varphi_5 \cdot \frac{K}{n_r} = 1,5 \cdot \frac{6 \text{ kN}}{2} = 4,5 \text{ kN}$$



Coefficient dynamique

Valeurs du coefficient dynamique φ_5	Usage spécifique
$\varphi_5 = 1,0$	pour les forces centrifuges
$1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$	pour les systèmes avec variation légère des forces
$1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$	pour les cas où des variations brutales peuvent se produire
$\varphi_5 = 3,0$	pour les systèmes d'entraînement comportant des jeux significatifs

Exemple de calcul

Transversalement:

$$H_{T,1} = \varphi_5 \cdot \xi_2 \cdot \frac{M}{a} = 1,5 \cdot 0,18 \cdot \frac{29,7}{2,5} = 3,2 \text{ kN}$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \cdot \xi_1 \cdot \frac{M}{a} = 1,5 \cdot 0,82 \cdot \frac{29,7}{2,5} = 14,6 \text{ kN}$$

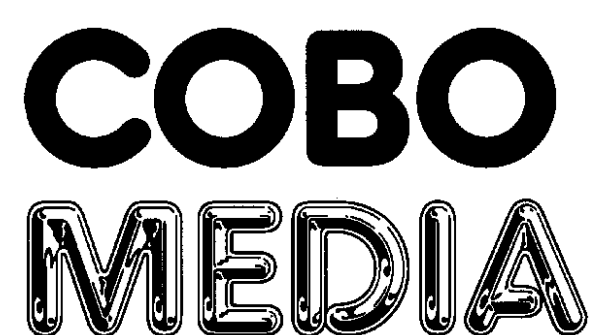
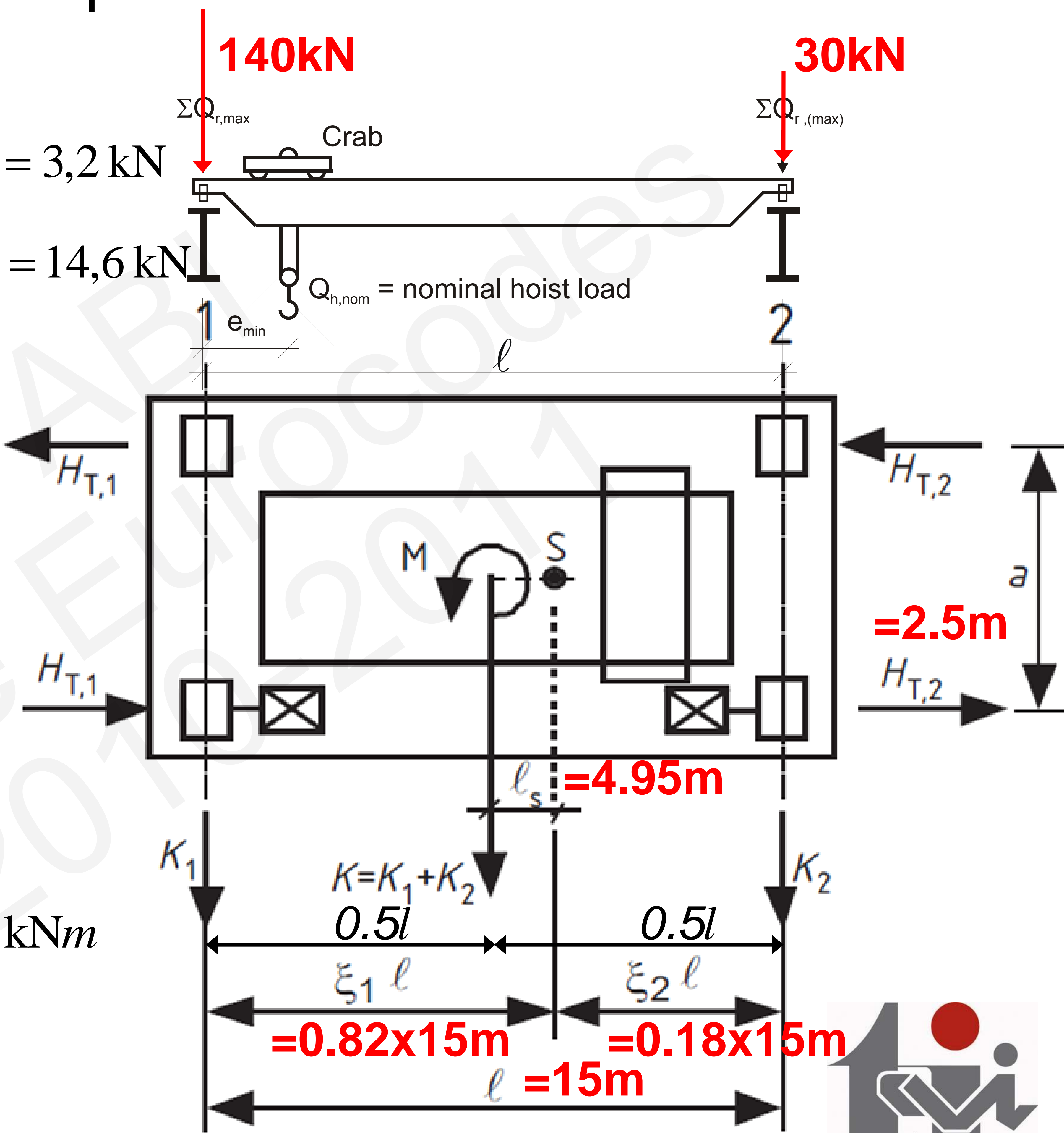
$$\begin{aligned} \sum Q_r &= \sum Q_{r,max} + \sum Q_{r,(max)} \\ &= 140,0 + 30,0 = 170,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\xi_1 = \frac{\sum Q_{r,max}}{\sum Q_r} = \frac{140}{170} = 0,82$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1 = 0,18$$

$$\begin{aligned} l_s &= (\xi_1 - 0,5) \cdot l \\ &= (0,82 - 0,5) \cdot 15,0 \text{ m} = 4,95 \text{ m} \end{aligned}$$

$$M = K \cdot l_s = 6,0 \text{ kN} \cdot 4,95 \text{ m} = 29,7 \text{ kNm}$$



Forces longitudinales ($H_{L,i}$) et forces transversales ($H_{T,i}$) dues à la marche en crabe de l'appareil de levage

- Force de guidage

$$S = f \cdot \lambda_{S,j} \cdot \sum Q_r$$

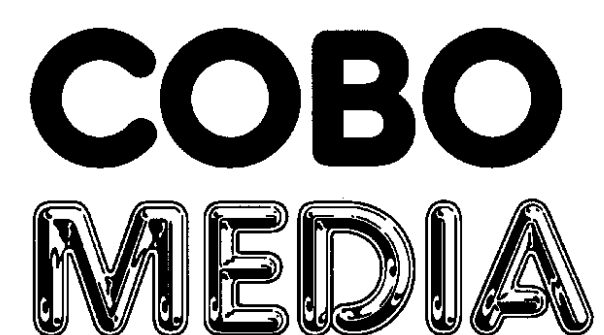
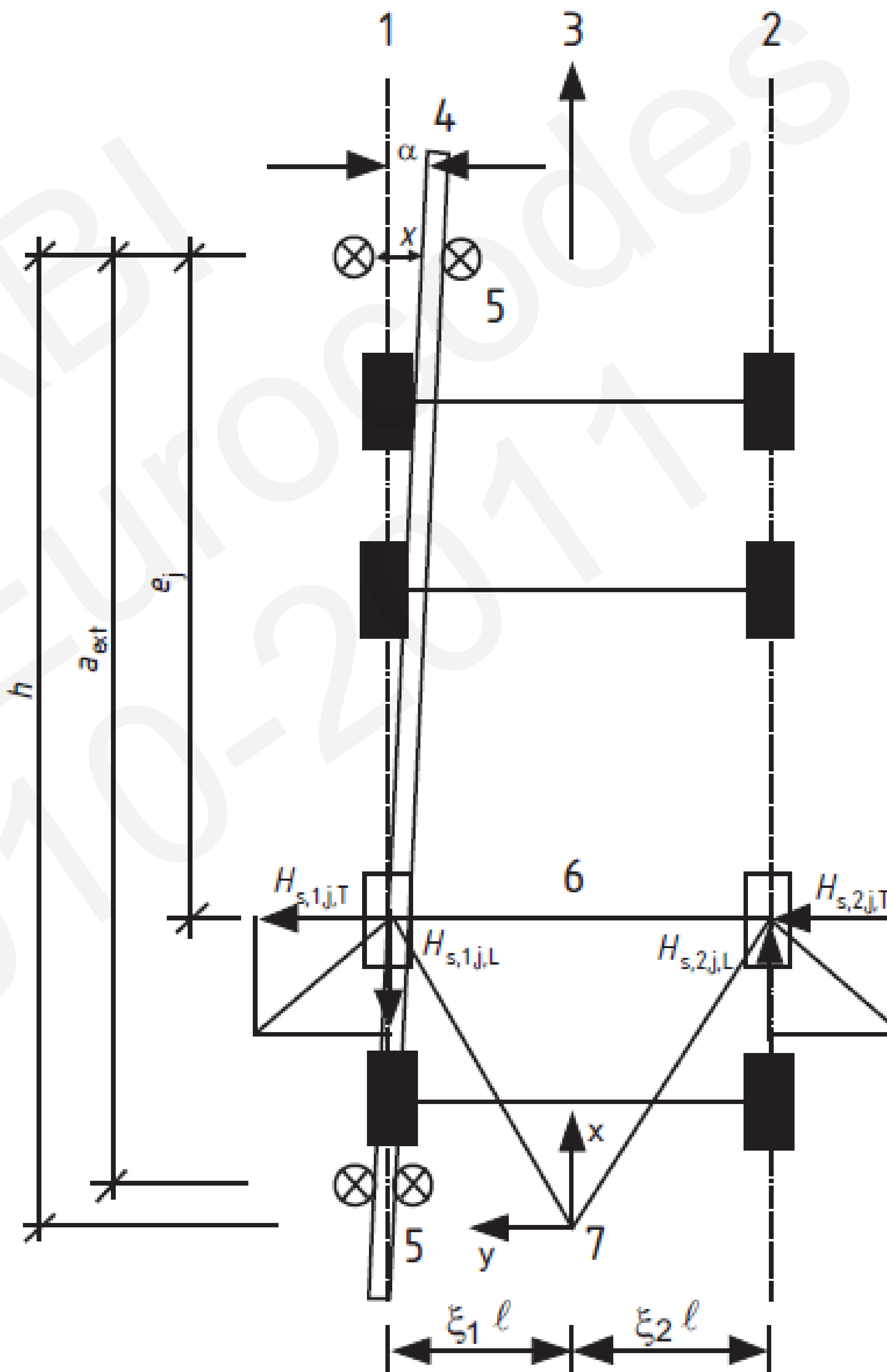
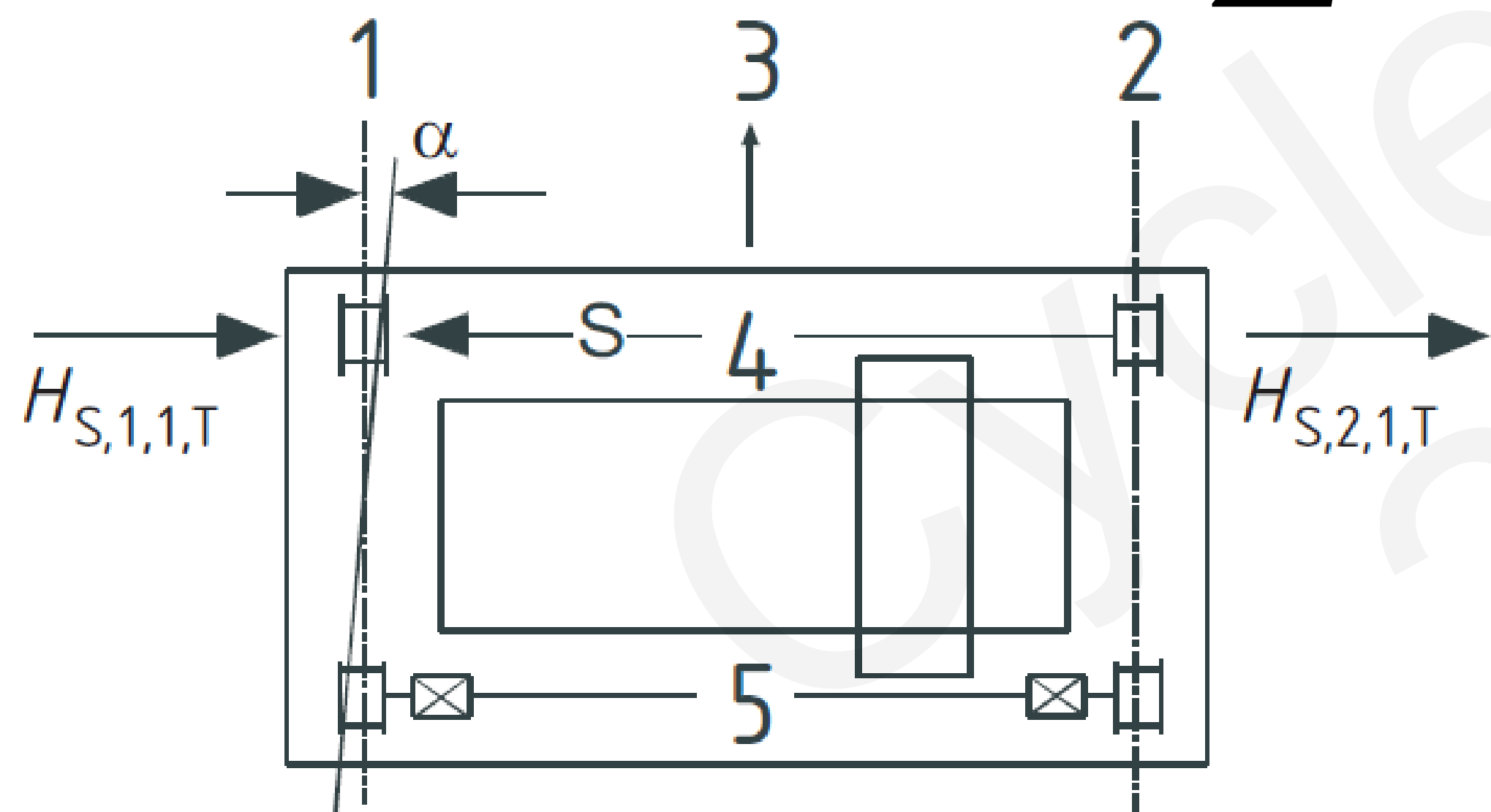
$$f = 0,3(1 - \exp(-250\alpha))$$

$$H_{S,1,j,L} = f \cdot \lambda_{S,1,j,L} \sum Q_r$$

$$H_{S,2,j,L} = f \cdot \lambda_{S,2,j,L} \sum Q_r$$

$$H_{S,1,j,T} = f \cdot \lambda_{S,1,j,T} \sum Q_r$$

$$H_{S,2,j,T} = f \cdot \lambda_{S,2,j,T} \sum Q_r$$



Forces longitudinales ($H_{L,i}$) et forces transversales ($H_{T,i}$) dues à la marche en crabe de l'appareil de levage

- L'angle α est déterminé en fonction de:
 - l'espace entre le dispositif de guidage et le rail (x);
 - une variation dimensionnelle (raisonnable) (α_0 , a_{ext});
 - l'usure des galets et des rails (y).

$$\alpha = \alpha_F + \alpha_v + \alpha_0 \leq 0,015 \text{ rad}$$

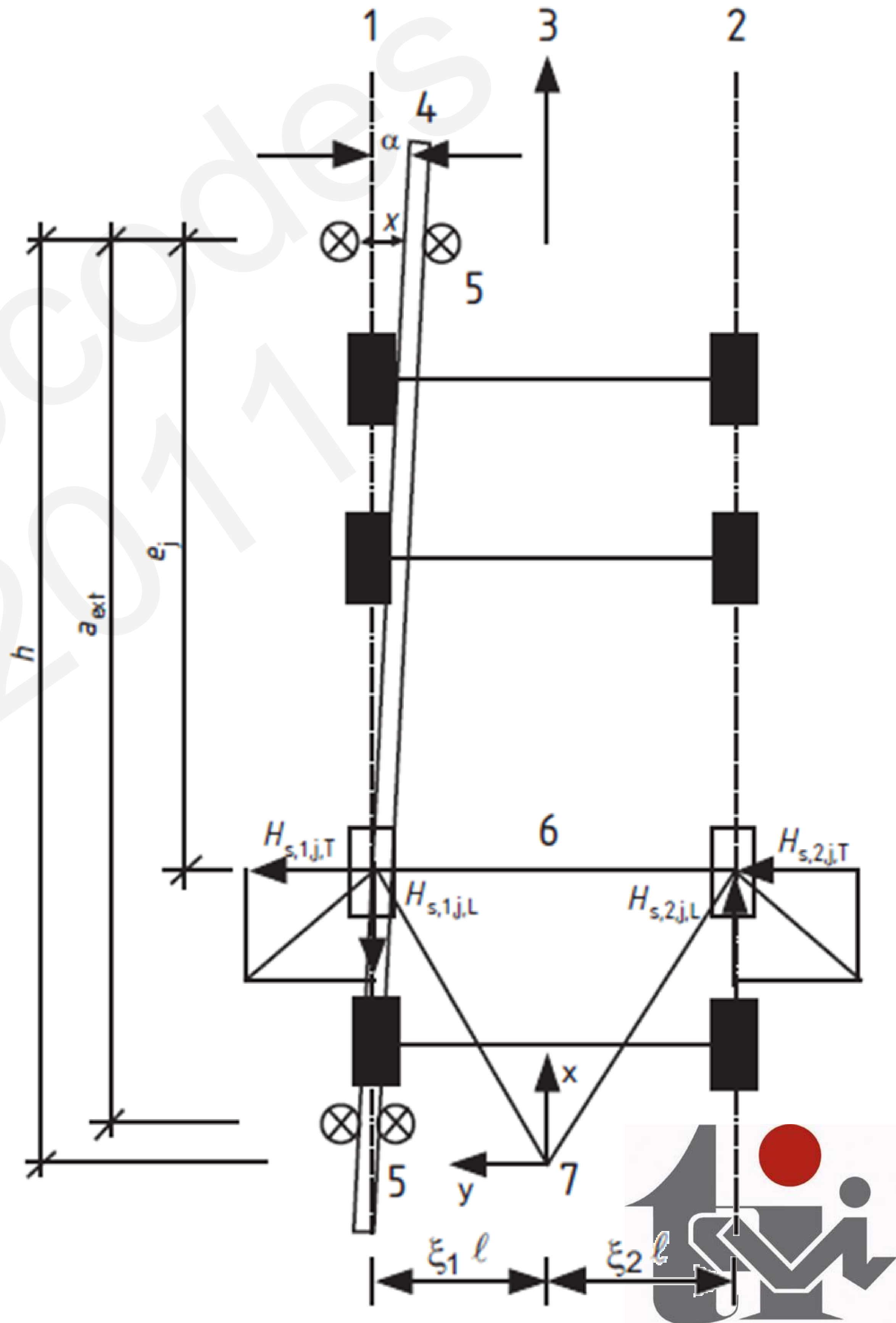


Tableau 2.7 — Définition de α_F, α_V et α_0

Angles α_i	Valeurs minimales de α_i
$\alpha_F = \frac{0,75 x}{a_{ext}}$	$0,75x \geq 5 \text{ mm}$ pour des galets de guidage
	$0,75x \geq 10 \text{ mm}$ pour des flasques de galets porteurs
$\alpha_V = \frac{y}{a_{ext}}$	$y \geq 0,03b$ en mm pour des galets de guidage
	$y \geq 0,10b$ en mm pour des flasques de galets porteurs
α_0	$\alpha_0 = 0,001$
<p>où :</p> <p>a_{ext} est la distance longitudinale entre les dispositifs de guidage extérieur ou les flasques de galets porteurs sur le rail de guidage ;</p> <p>b est la largeur de la tête du rail ;</p> <p>x est le gabarit entre le rail et le dispositif de guidage (glissement latéral) ;</p> <p>y est l'usure du rail et le dispositif de guidage ;</p> <p>α_0 est la tolérance angulaire entre la direction du rail et celle des galets</p>	

Exemple de calcul

$$\alpha_F = \frac{0,75 x}{a} = \frac{10}{2500} = 0,004 \text{ rad}$$

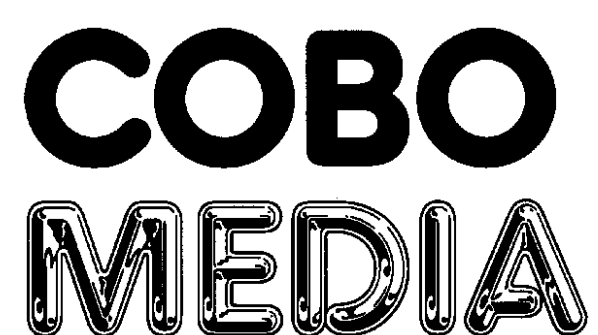
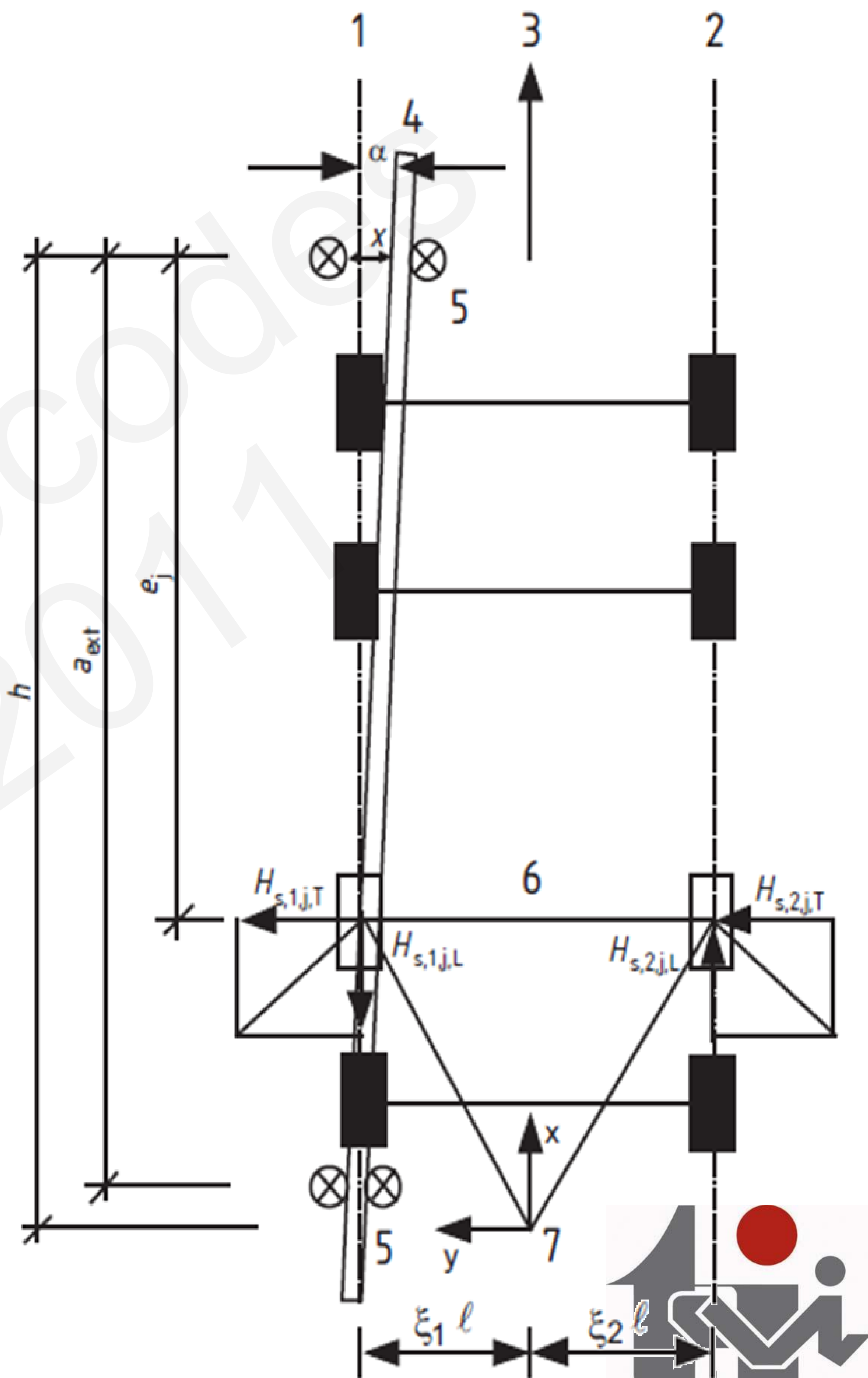
$$\alpha_V = \frac{y}{a} = \frac{0,1 \cdot 50}{2500} = 0,002 \text{ rad}$$

$$\alpha_0 = 0,001 \text{ rad}$$

$$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 = 0,007 \text{ rad}$$




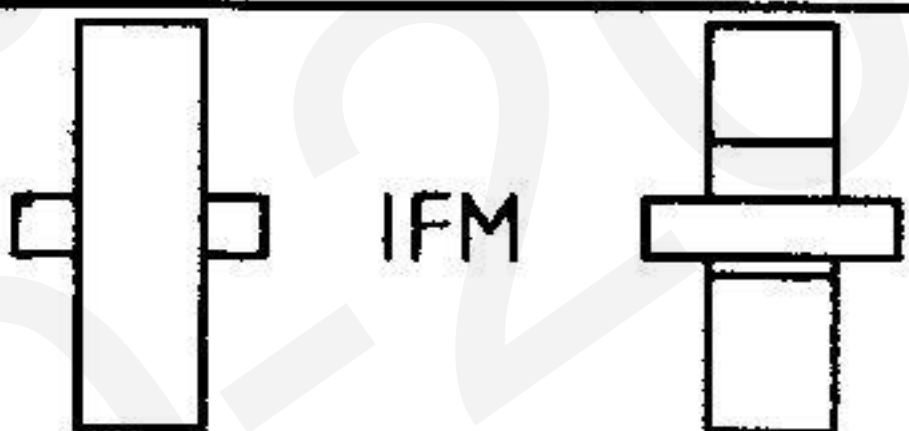
$$f = 0,3 (1 - \exp(-250 \alpha))$$

$$= 0,3 (1 - \exp(-250 \cdot 0,007)) = 0,248 \leq 0,3$$



Forces longitudinales ($H_{L,i}$) et forces transversales ($H_{T,i}$) dues à la marche en crabe de l'appareil de levage

- Distance h

Fixation des galets vis à vis des mouvements latéraux	Combinaison des paires de galets		h
	couplés (c)	indépendants (i)	
Fixe/fixe FF			$\frac{m \xi_1 \xi_2 l^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$
Fixe/mobile FM			$\frac{m \xi_1 l^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$

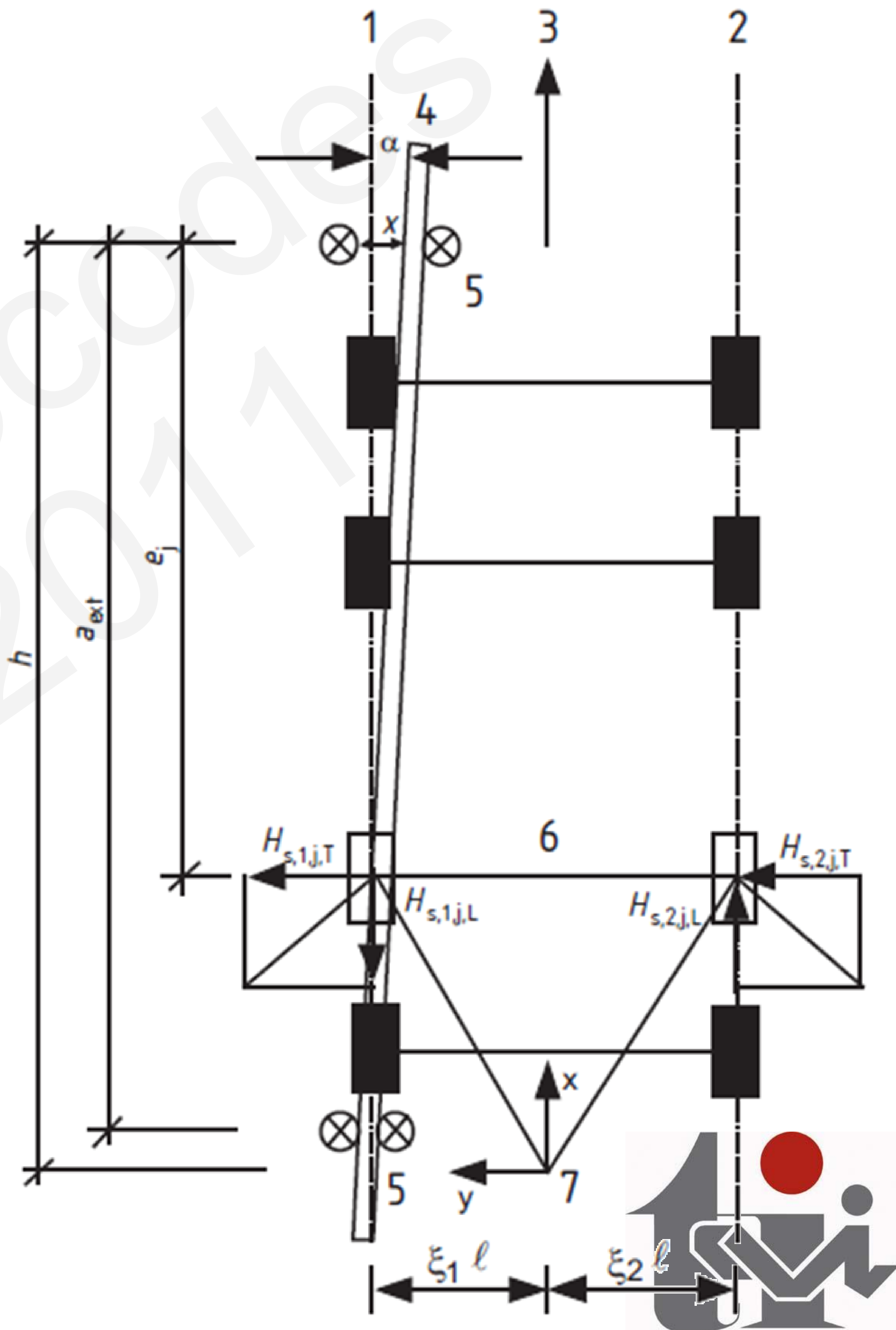
où :

- h est la distance entre le centre instantané de rotation et le dispositif de guidage concerné ;
- m est le nombre de paires de galets couplés ($m = 0$ pour des paires de galets indépendants) ;
- $\xi_1 l$ est la distance entre le centre instantané de rotation et le rail 1 ;
- $\xi_2 l$ est la distance entre le centre instantané de rotation et le rail 2 ;
- l est la portée de l'appareil ;
- e_j est la distance entre la paire de galets j et le dispositif de guidage concerné.

Exemple de calcul

- hauteur h :
- $e_1 = 0$ as flanged wheels are used
- $e_2 = a = 2,50$ m
- $m=0$ for independent wheel pairs.

$$h = \frac{m\xi_1\xi_2l^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j} = \frac{0 + 2,50^2}{2,50} = 2,50 \text{ m}$$



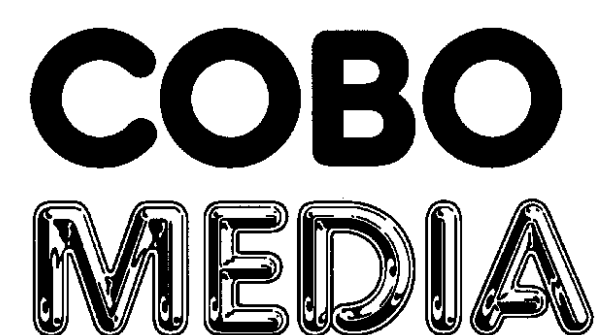
Forces longitudinales ($H_{L,i}$) et forces transversales ($H_{T,i}$) dues à la marche en crabe de l'appareil de levage

- Coefficients de force λ

Systeme	$\lambda_{s,j}$	$\lambda_{s,1,j,L}$	$\lambda_{s,1,j,T}$	$\lambda_{s,2,j,L}$	$\lambda_{s,2,j,T}$
CFF	$1 - \frac{\sum e_j}{nh}$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{l}{h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{l}{h}$	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
IFF		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
CFM	$\xi_2 \left(1 - \frac{\sum e_j}{nh}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{l}{h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{l}{h}$	0
IFM		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	0

où :

- n est le nombre de paires de galets ;
- $\xi_1 l$ est la distance entre le centre instantané de rotation et le rail 1 ;
- $\xi_2 l$ est la distance entre le centre instantané de rotation et le rail 2 ;
- l est la portée de l'appareil ;
- e_j est la distance entre la paire de galets j et le dispositif de guidage concerné ;
- h est la distance entre le centre instantané de rotation et le dispositif de guidage concerné.



Exemple de calcul

Coefficients de force λ

$$\lambda_{S,1,L} = 0$$

$$\lambda_{S,2,L} = 0$$

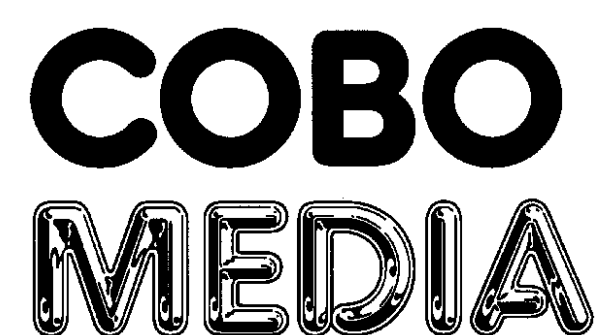
$$\begin{aligned}\lambda_S &= \lambda_{S,1} = \lambda_{S,2} \\ &= 1 - \frac{\sum e_j}{n \cdot h} \\ &= 1 - \frac{2,50}{2 \cdot 2,50} = 0,5\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{S,1,1,T} &= \frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_1}{h} \right) \\ &= \frac{0,18}{2} (1 - 0) \\ &= 0,09\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{S,2,1,T} &= \frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_1}{h} \right) \\ &= \frac{0,82}{2} (1 - 0) \\ &= 0,41\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{S,1,2,T} &= \frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_2}{h} \right) \\ &= \frac{0,18}{2} \left(1 - \frac{2,50}{2,50} \right) = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{S,2,2,T} &= \frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_2}{h} \right) \\ &= \frac{0,82}{2} \left(1 - \frac{2,50}{2,50} \right) = 0\end{aligned}$$



Exemple de calcul

- Forces longitudinales ($H_{L,i}$) et forces transversales ($H_{T,i}$):

$$H_{S,1,j,L} = f \cdot \lambda_{S,1,j,L} \sum Q_r = 0$$

$$H_{S,2,j,L} = f \cdot \lambda_{S,2,j,L} \sum Q_r = 0$$

$$H_{S,1,j,T} = f \cdot \lambda_{S,1,j,T} \sum Q_r$$

$$H_{S,2,j,T} = f \cdot \lambda_{S,2,j,T} \sum Q_r$$

$$\lambda_{S,1,1,T} = 0,09$$

$$\lambda_{S,2,1,T} = 0,41$$

$$H_{S,1,j=1,T} =$$

$$0,248 \cdot 0,09 \cdot 170,0 \text{ kN}$$

$$= 3,8 \text{ kN}$$

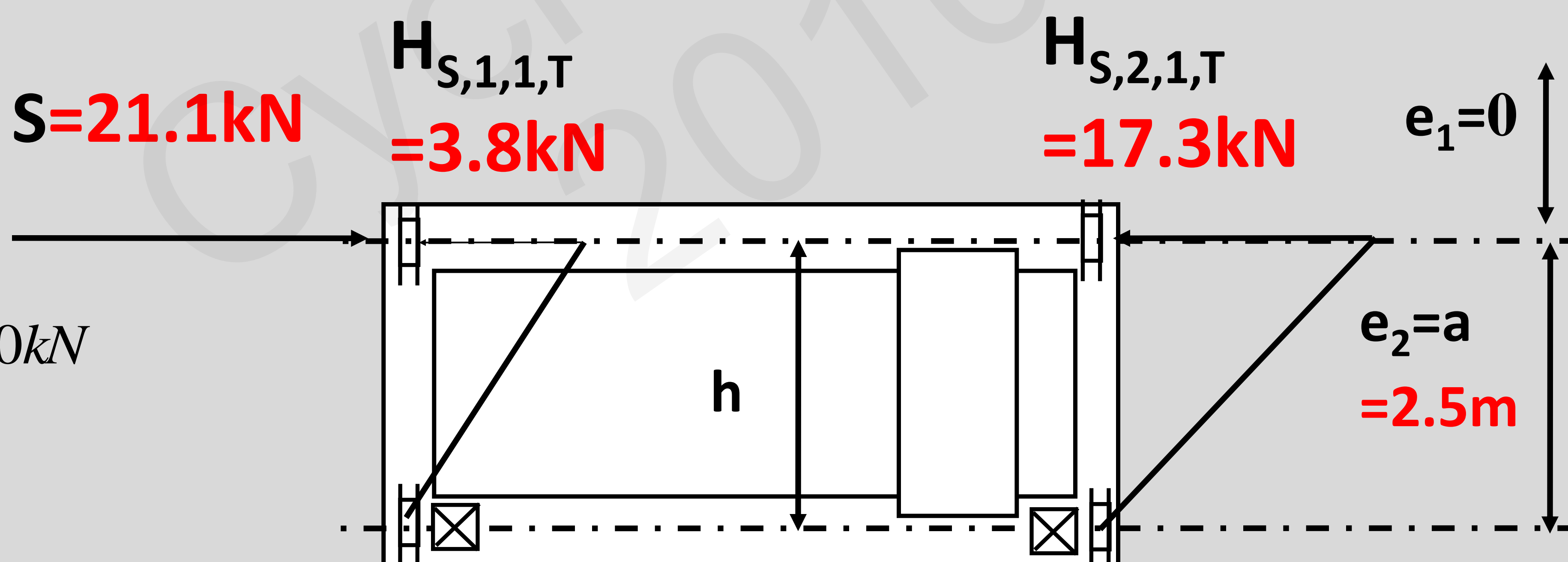
$$H_{S,2,j=1,T} =$$

$$0,248 \cdot 0,41 \cdot 170,0 \text{ kN}$$

$$= 17,3 \text{ kN}$$

$$H_{S,1,2,T} = 0 \text{ kN}$$

$$H_{S,2,2,T} = 0 \text{ kN}$$



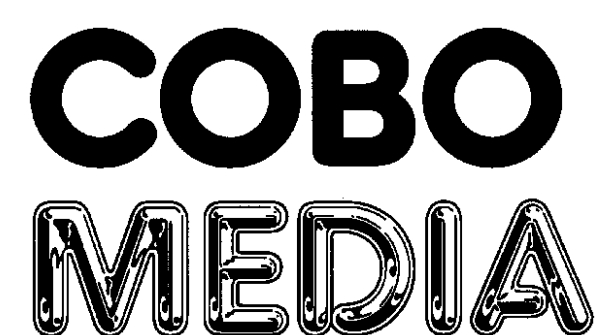
$$\lambda_{S,1,2,T} = 0$$

$$\lambda_{S,2,2,T} = 0$$

Forces horizontales produites lors des accélérations et des décélérations du chariot

- 10% de la masse à lever ($Q_h = 100\text{kN}$)
- 10% du poids du chariot ($Q_{c,2} = 10\text{ kN}$).

$$H_{T,3} = 0,1 \cdot (10,0 + 100,0) = 11,0\text{ kN}$$



Forces de tamponnement

- Actions accidentelle
- $H_{B,1}$: Force de tamponnement liée au déplacement de l'appareil de levage

$$H_{B,1} = \varphi_7 v_1 \sqrt{m_c S_B} \quad (2.15)$$

où :

φ_7

voir Tableau 2.10 ;

v_1

est égal à 70 % de la vitesse de déplacement longitudinale [m/s] ;

m_c

est le total de la masse de l'appareil de levage et de la masse à lever [kg] ;

S_B

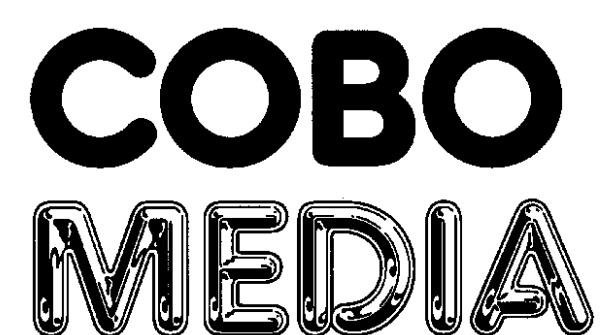
est la constante de raideur du tampon [N/m].

Tableau 2.10 — Coefficient dynamique φ_7

Valeur du coefficient dynamique φ_7	Caractéristique du tampon
$\varphi_7 = 1,25$	$0,0 \leq \xi_b \leq 0,5$
$\varphi_7 = 1,25 + 0,7 (\xi_b - 0,5)$	$0,5 \leq \xi_b \leq 1$
NOTE	ξ_b peut être déterminé approximativement d'après la Figure 2.9

Forces de tamponnement

- $H_{B,2}$: Force de tamponnement liée au déplacement du chariot
- Somme de :
 - 10% de la masse à lever ($Q_h = 100\text{kN}$)
 - 10% du poids du chariot ($Q_{c,2} = 10\text{ kN}$).



Charges de fatigue

(4) La charge de fatigue peut être spécifiée comme suit :

$$Q_e = \varphi_{fat} \times \lambda_i \times Q_{max,i} \quad (2.16)$$

où :

$Q_{max,i}$

est la valeur maximale de la charge caractéristique verticale du galet i ;

$\lambda_i = \lambda_{1,i} \times \lambda_{2,i}$ est le coefficient de dommage équivalent pour tenir compte du spectre de charges de fatigue normalisé applicable et du rapport entre le nombre réel de cycles de charge et le nombre $N = 2,0 \times 10^6$;



**COBO
MEDIA**



Charges de fatigue

Tableau 2.11 — Classification des actions de fatigue des appareils de levage selon l'EN 13001-1

Classe du spectre de charge		Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
		$kQ \leq 0,0313$	$0,0313 < kQ \leq 0,0625$	$0,0625 < kQ \leq 0,125$	$0,125 < kQ \leq 0,25$	$0,25 < kQ \leq 0,5$	$0,5 < kQ \leq 1,0$
classe du nombre total de cycles							
U_0	$C \leq 1,6 \cdot 10^4$	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
U_1	$1,6 \times 10^4 < C \leq 3,15 \times 10^4$	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_1
U_2	$3,15 \times 10^4 < C \leq 6,30 \times 10^4$	S_0	S_0	S_0	S_0	S_1	S_2
U_3	$6,30 \times 10^4 < C \leq 1,25 \times 10^5$	S_0	S_0	S_0	S_1	S_2	S_3
U_4	$1,25 \times 10^5 < C \leq 2,50 \times 10^5$	S_0	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4
U_5	$2,50 \times 10^5 < C \leq 5,00 \times 10^5$	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
U_6	$5,00 \times 10^5 < C \leq 1,00 \times 10^6$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
U_7	$1,00 \times 10^6 < C \leq 2,00 \times 10^6$	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
U_8	$2,00 \times 10^6 < C \leq 4,00 \times 10^6$	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
U_9	$4,00 \times 10^6 < C \leq 8,00 \times 10^6$	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9

où :

kQ est le coefficient de spectre de charge pour toutes les tâches de l'appareil de levage ;

C est le nombre total des cycles de travail pendant la durée de vie de calcul de l'appareil de levage.

NOTE Les classes S_i sont distribuées d'après le paramètre de l'historique des effets de contrainte s donné dans l'EN 13001-1 et défini comme suit :

$s = \nu k$ où :

k est le coefficient de spectre de contraintes ;

ν est le rapport entre le nombre de cycles de contrainte C et $2,0 \times 10^6$.

La classification est basée sur une durée de vie totale de 25 ans.

Charges de fatigue

Tableau 2.12 — Valeurs λ_1 selon la classification des appareils de levage

Classes S	S	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
Contraintes normales	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,00	1,260	1,587
Contraintes de cisaillement	0,379	0,436	0,500	0,575	0,660	0,758	0,871	1,00	1,149	1,320

NOTE 1 Des spectres normalisés avec une répartition gaussienne des effets des charges, la loi de Miner et les lignes S-N de résistance à la fatigue avec une pente $m = 3$ pour des contraintes normales et $m = 5$ pour des contraintes de cisaillement ont été utilisés pour déterminer les valeurs λ .

NOTE 2 Dans le cas où la classification ne figure pas dans les documents de spécification de l'appareil de levage, des indications sont données dans l'annexe B.

Charges de fatigue – Exemple de calcul

- Coefficients dynamiques:

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2} = \frac{1 + 1,1}{2} = 1,05$$

sur le poids propre de l'appareil de levage

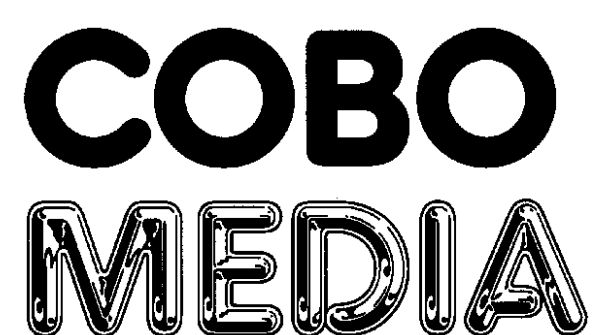
$$\varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2} = \frac{1 + 1,2}{2} = 1,10$$

sur la masse à lever

$$\begin{aligned} \sum \varphi_{fat,i} Q_{max,i} &= \frac{1}{2} \varphi_{fat,1} \left[\frac{Q_{c1}}{2} + Q_{c2} \left(\frac{\ell - e_{min}}{\ell} \right) \right] + \frac{1}{2} \varphi_{fat,2} Q_h \left(\frac{\ell - e_{min}}{\ell} \right) \\ &= \frac{1}{2} 1,05 \left[\frac{60}{2} + 10 \left(\frac{15 - 0}{15} \right) \right] + \frac{1}{2} 1,1 \times 100 \left(\frac{15 - 0}{15} \right) = 76 kN \end{aligned}$$

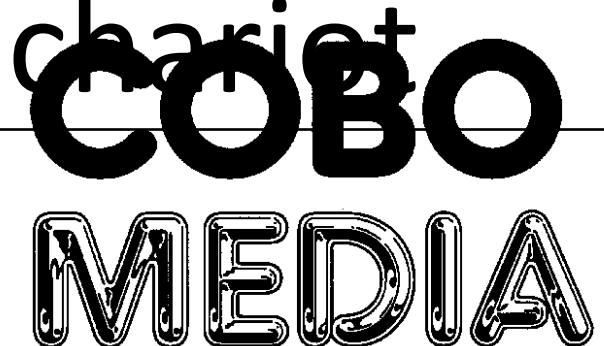
- Contraintes normales: $Q_e = \varphi_{fat,i} \cdot \lambda_i \cdot Q_{max,i} = 0,794 \times 76 kN = 60,3 kN$
(classe S6):

- Contraintes de cisaillement: $Q_e = \varphi_{fat,i} \cdot \lambda_i \cdot Q_{max,i} = 0,871 \times 76 kN = 66,2 kN$



Résumé des charges

Groupes de charges			États Limites Ultimes					
			1	2	3	4	5	6
Coefficients dynamiques			$\varphi_1=1,10$ $\varphi_2=1,20$ $\varphi_5=1,50$	$\varphi_1=1,10$ $\varphi_3=1,00$ $\varphi_5=1,50$	$\varphi_1=1,00$ $\varphi_5=1,50$	$\varphi_4=1,00$ $\varphi_5=1,50$	$\varphi_4=1,00$	$\varphi_4=1,00$
Charges verticales	Poids propre de l'appareil	$Q_{r,(min)}$	22,0 kN	22,0 kN	20,0 kN	20,0 kN	20,0 kN	20,0 kN
		$Q_{r,min}$	16,5 kN	16,5 kN	15,0 kN	15,0 kN	15,0 kN	15,0 kN
	Poids propre de l'appareil et de la masse à lever	$Q_{r,(max)}$	16,5 kN	16,5 kN	-	15,0 kN	15,0 kN	15,0 kN
		$Q_{r,max}$	82,0 kN	72,0 kN	-	70,0 kN	70,0 kN	70,0 kN
Charges horizontales	Accélération de l'appareil de levage	$H_{L,1}$	4,5 kN	4,5 kN	4,5 kN	4,5 kN	-	-
		$H_{L,2}$	4,5 kN	4,5 kN	4,5 kN	4,5 kN	-	-
		$H_{T,1}$	3,2 kN	3,2 kN	3,2 kN	3,2 kN	-	-
		$H_{T,2}$	14,6 kN	14,6 kN	14,6 kN	14,6 kN	-	-
	Mise en crabe	$H_{S1,L}$	-	-	-	-	0	-
		$H_{S2,L}$	-	-	-	-	0	-
		$H_{S1,T}$	-	-	-	-	17,3 kN	-
		$H_{S2,T}$	-	-	-	-	17,3 kN	-
Accélération du chariot	$H_{T,3}$	-	-	-	-	-	11,0 kN	

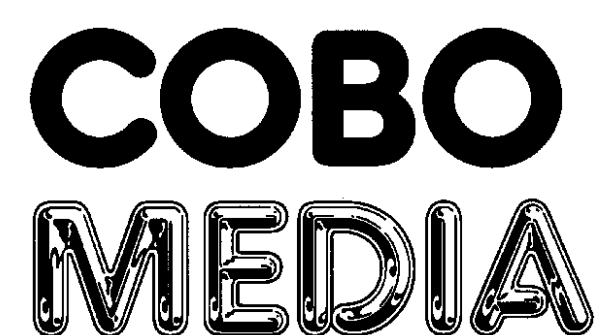


Poutres de roulement – Effets des charges à considérer

(1) Il convient de prendre en compte dans le calcul des poutres de roulement les sollicitations suivantes provoquées par les charges de pont roulant :

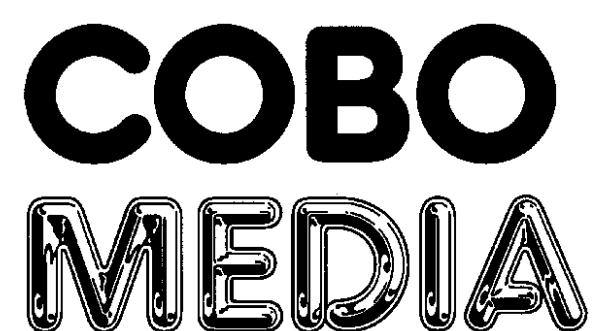
- flexion biaxiale provoquée par les actions verticales et les actions horizontales latérales ;
- traction ou compression axiale provoquée par les actions horizontales longitudinales ;
- torsion provoquée par les excentricités des actions horizontales latérales, par rapport au centre de torsion de la section transversale de la poutre ;
- efforts tranchants verticaux et horizontaux provoqués par les actions verticales et les actions horizontales latérales.

(2) Il convient également de tenir compte des efforts locaux dus aux charges des galets.



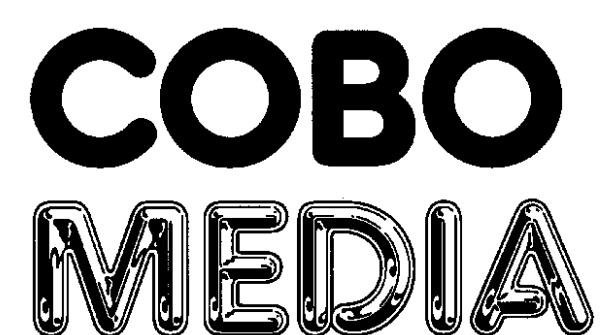
Vérifications aux états limites ultimes

- Résistance des sections transversales
 - Déversement
 - Résistance de l'âme aux charges des galets
 - Résistance de la semelle inférieure aux charges des galets
-
- Flambement
 - Éléments composés comprimés
 - Voilement des plaques

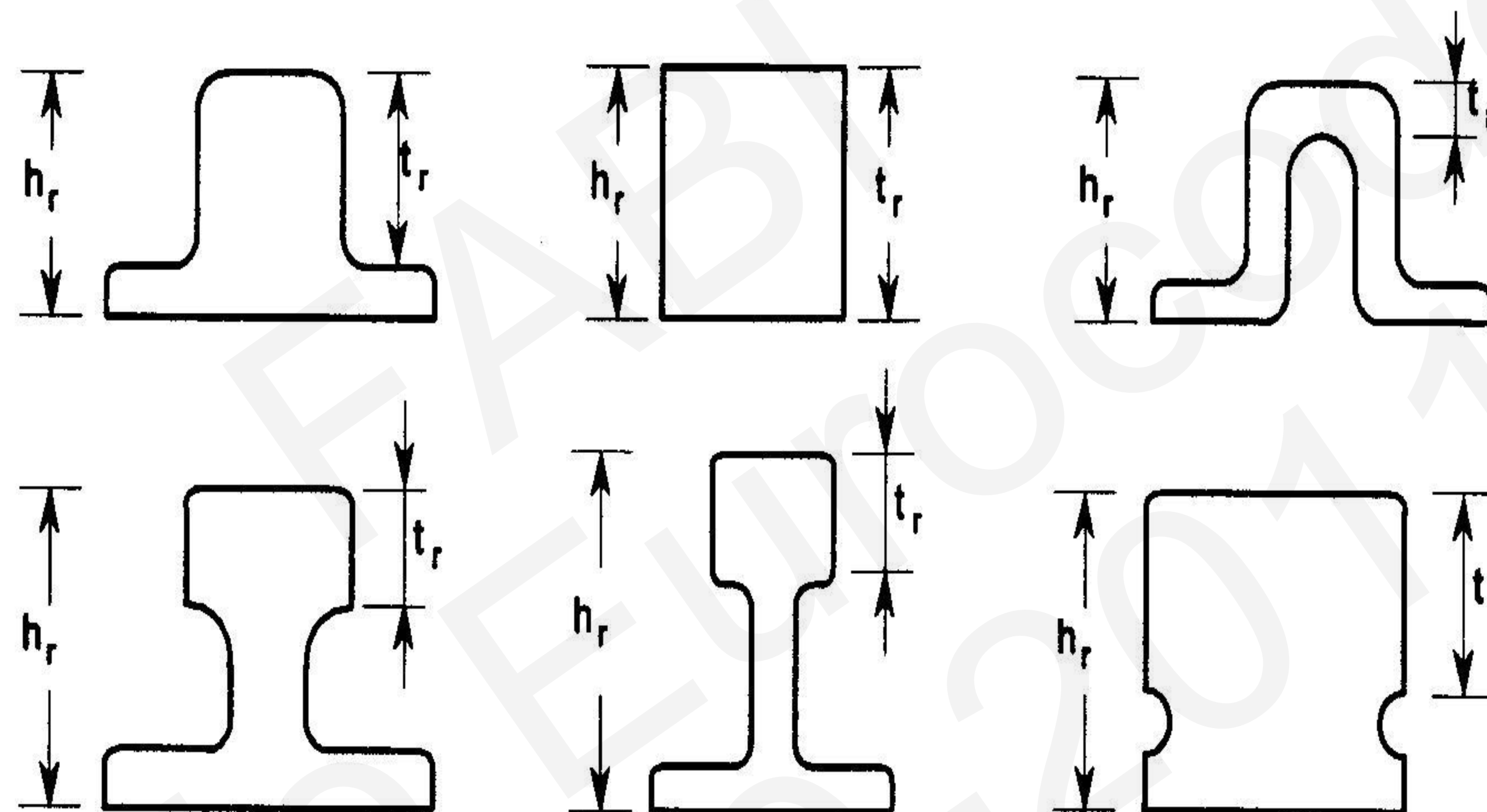


Vérifications aux états limites de service

- Déformations
- Déplacements
- Fatigue
- ...
- Respiration d'âme
- Vibrations



Types de rails



h_r : hauteur du rail

t_r : épaisseur sous la face d'usure

Contrainte locale verticale dans l'âme

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} t_w}$$

où : $F_{z,Ed}$ est la valeur de calcul de la charge des galets ;

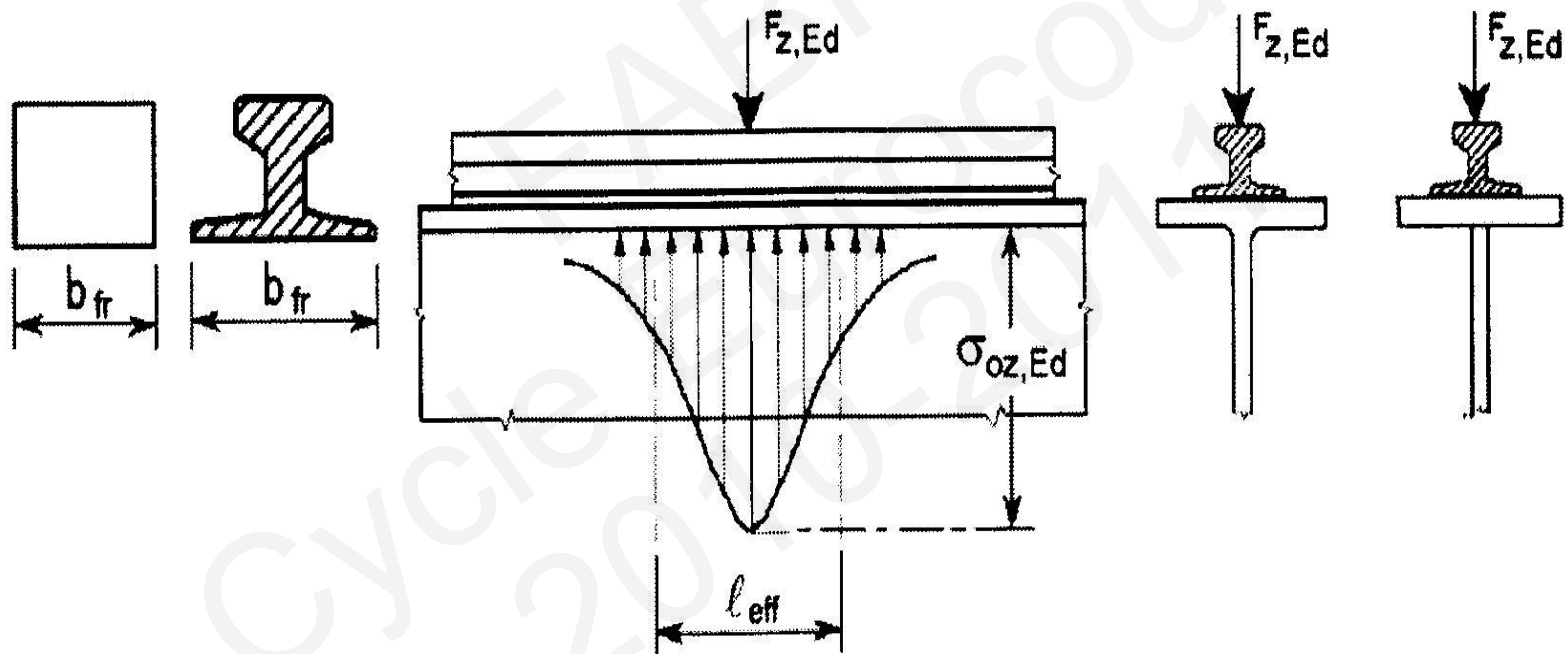
l_{eff} est la longueur chargée efficace ;

t_w est l'épaisseur de l'âme.



Contrainte locale verticale dans l'âme

Longueur chargée efficace



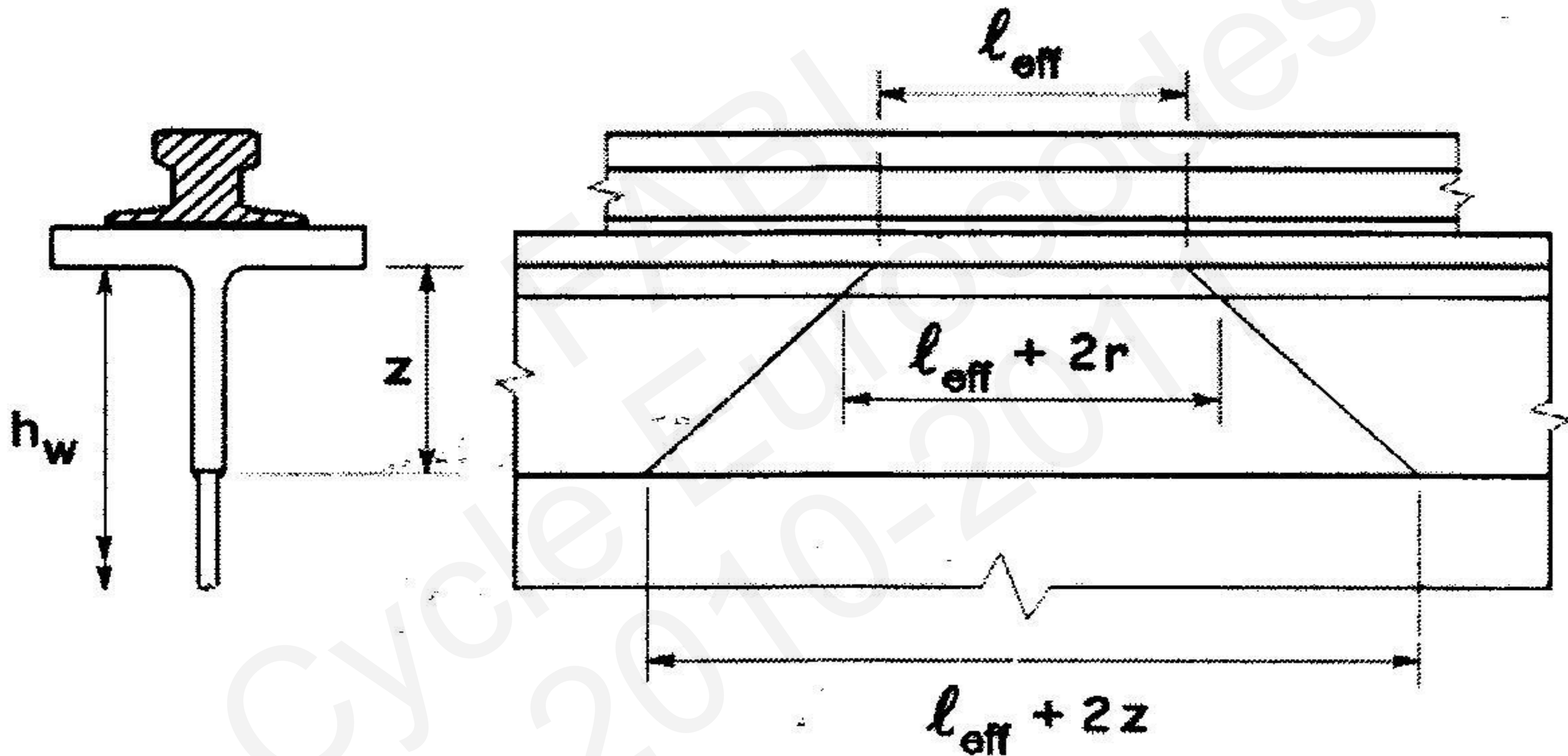
Contrainte locale verticale dans l'âme

Longueur chargée efficace

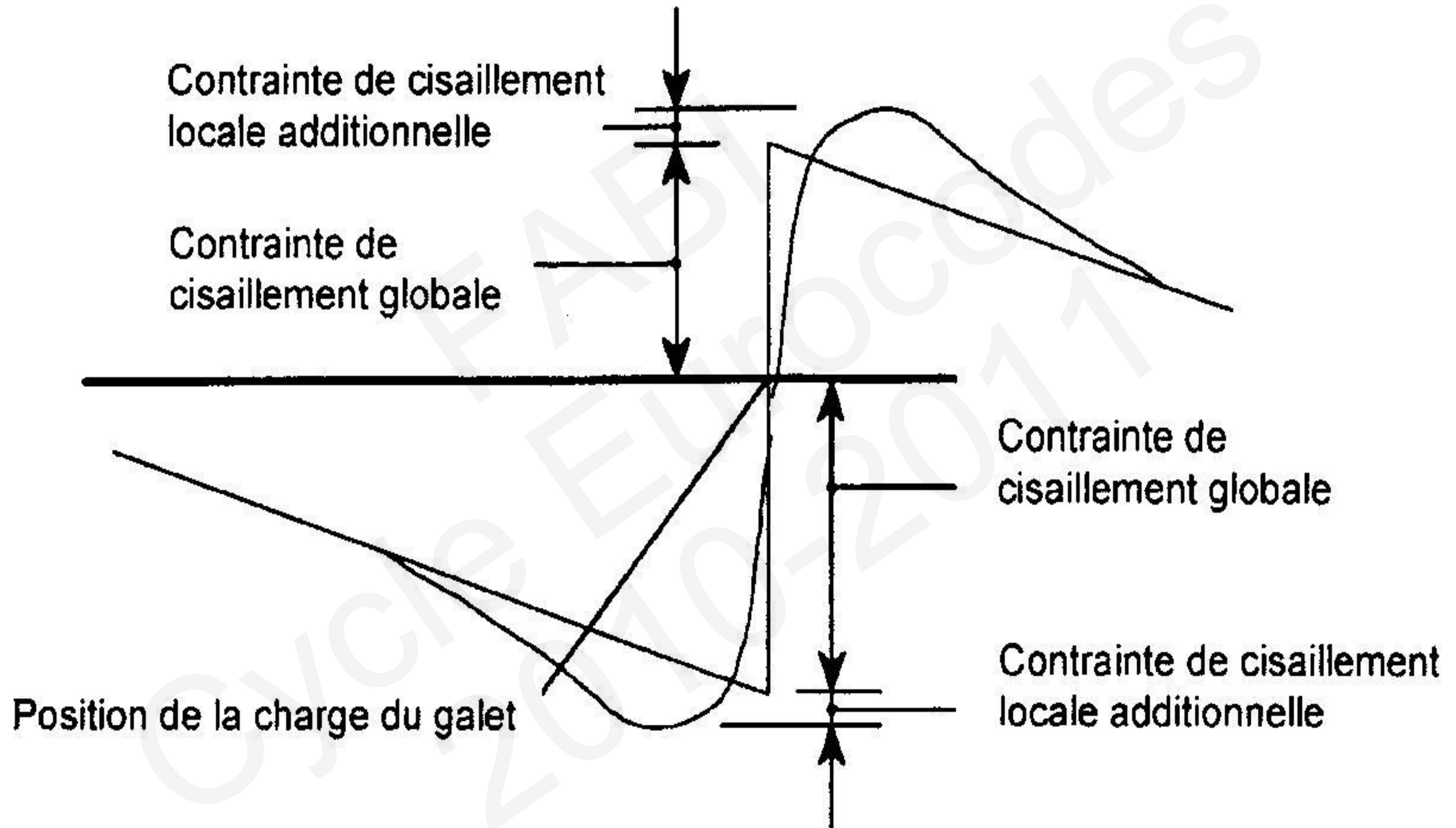
Tableau 5.1 : Longueur chargée efficace ℓ_{eff}

Cas	Description	Longueur chargée efficace ℓ_{eff}
(a)	Rail de pont roulant fixé de façon rigide sur la semelle	$\ell_{\text{eff}} = 3,25 [I_{\text{rf}} / t_w]^{1/3}$
(b)	Rail de pont roulant non fixé de façon rigide sur la semelle	$\ell_{\text{eff}} = 3,25 [(I_r + I_{\text{f,eff}}) / t_w]^{1/3}$
(c)	Rail de pont roulant monté sur un intercalaire de répartition en élastomère résilient approprié d'au moins 6 mm d'épaisseur.	$\ell_{\text{eff}} = 4,25 [(I_r + I_{\text{f,eff}}) / t_w]^{1/3}$
$I_{\text{f,eff}}$	est le moment d'inertie de flexion, selon son axe neutre horizontal, d'une semelle de largeur efficace b_{eff}	
I_r	est le moment d'inertie de flexion, selon son axe neutre horizontal, du rail	
I_{rf}	est le moment d'inertie de flexion, selon son axe neutre horizontal, de la section transversale combinée comprenant le rail et une semelle d'une largeur efficace b_{eff}	
t_w	est l'épaisseur d'âme.	
$b_{\text{eff}} = b_{\text{fr}} + h_r + t_f$ avec $b_{\text{eff}} \leq b$		
où :	b est la largeur hors-tout de la semelle supérieure ; b_{fr} est la largeur du pied du rail, voir Figure 5.2 ; h_r est la hauteur du rail, voir Figure 5.1 ; t_f est l'épaisseur de semelle.	
Note Tenir compte d'une usure du rail de pont roulant, voir 5.6.2(2) et 5.6.2(3) dans le calcul de I_r , I_{rf} et h_r .		

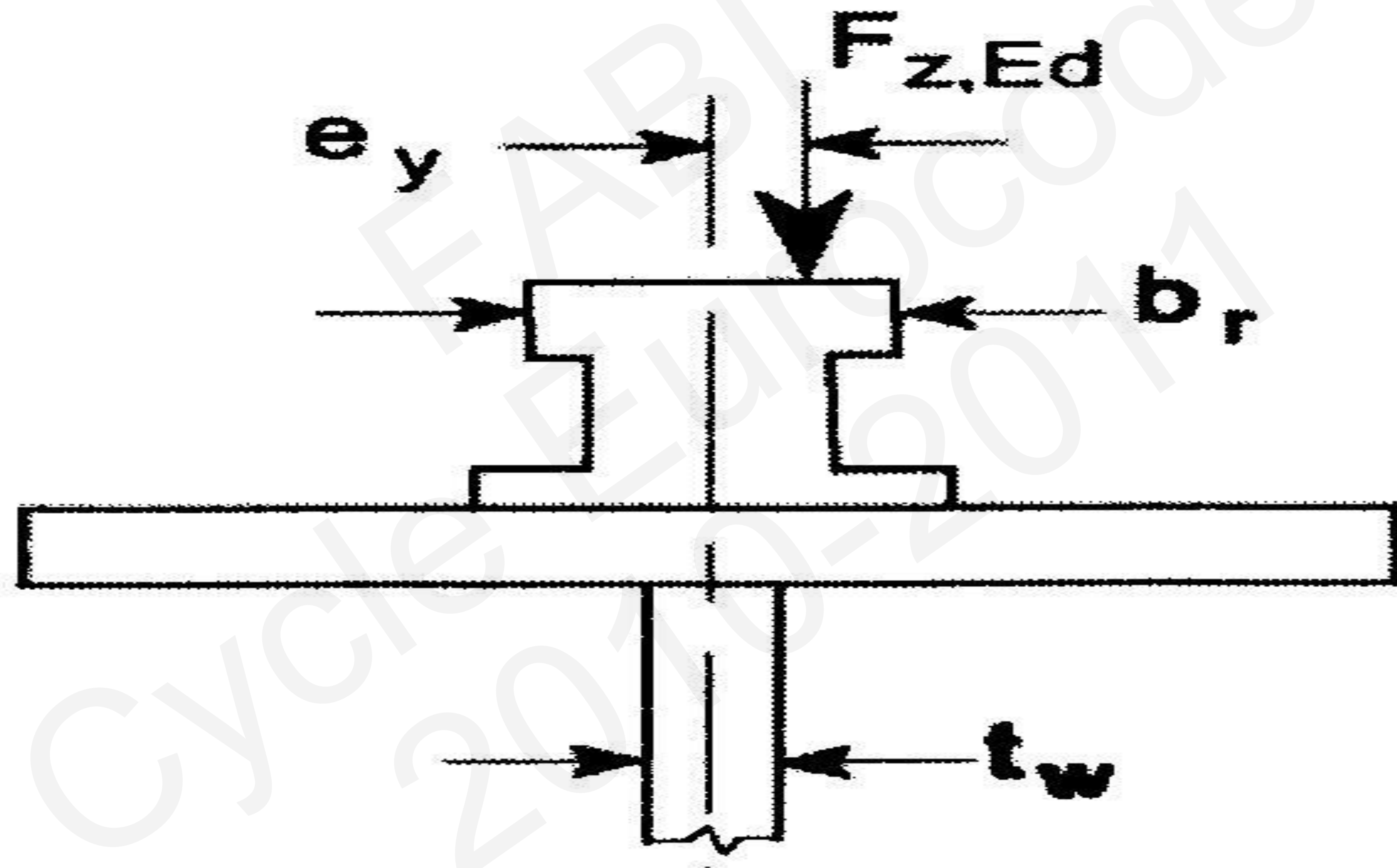
Répartition des contraintes de compression



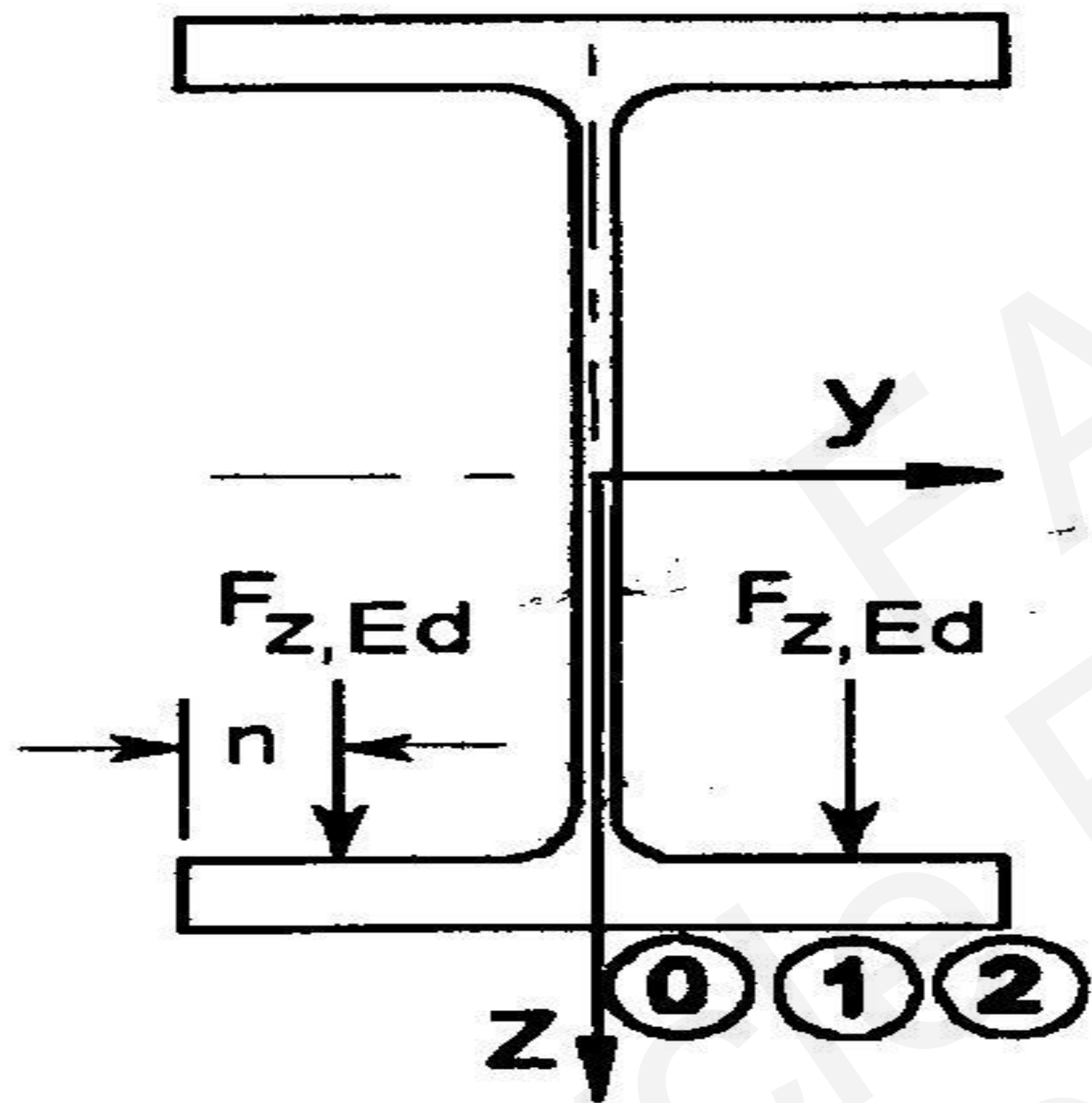
Contraintes locales de cisaillement



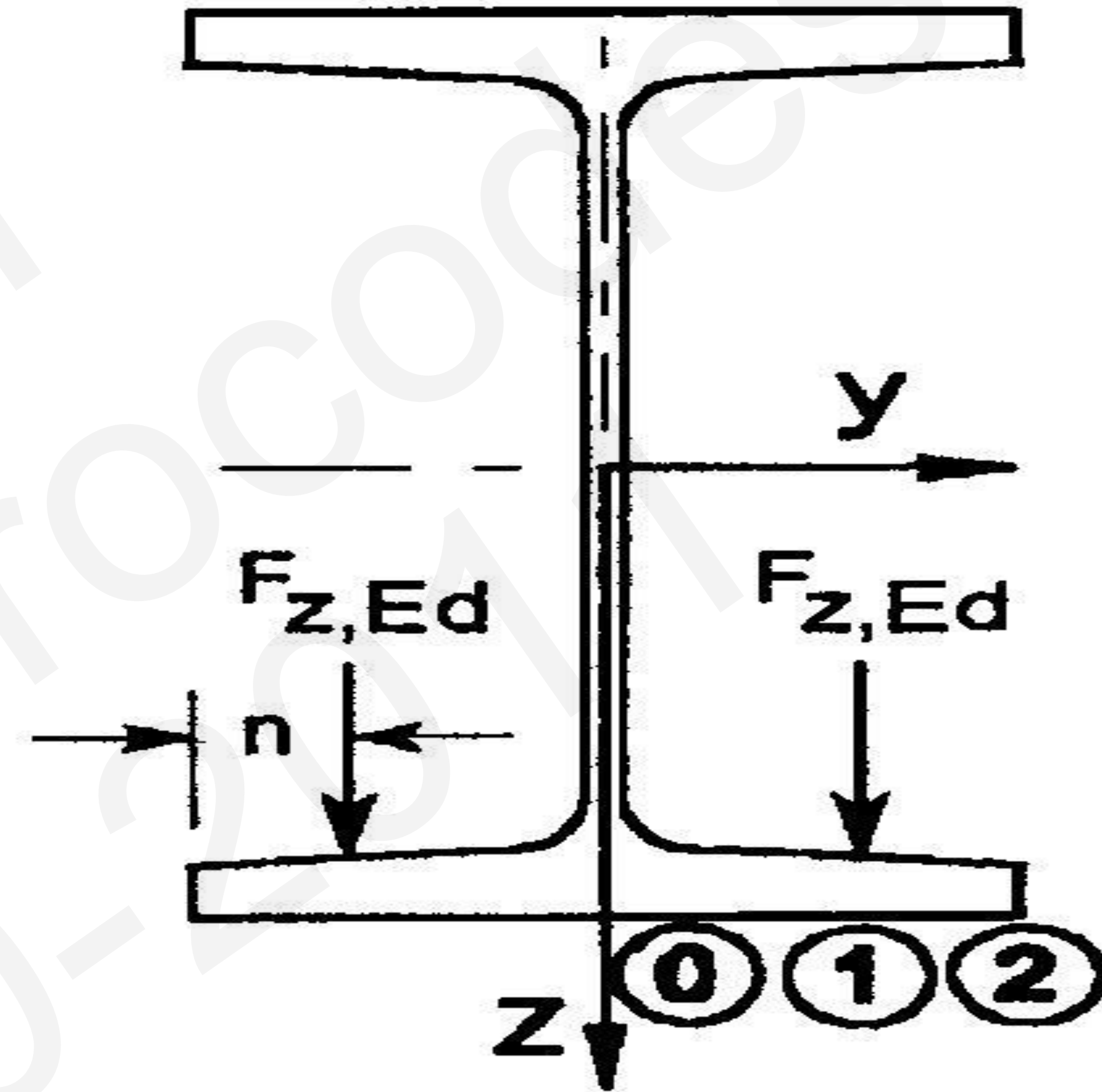
Torsion de la semelle supérieure



Flexion locale sur la semelle inférieure

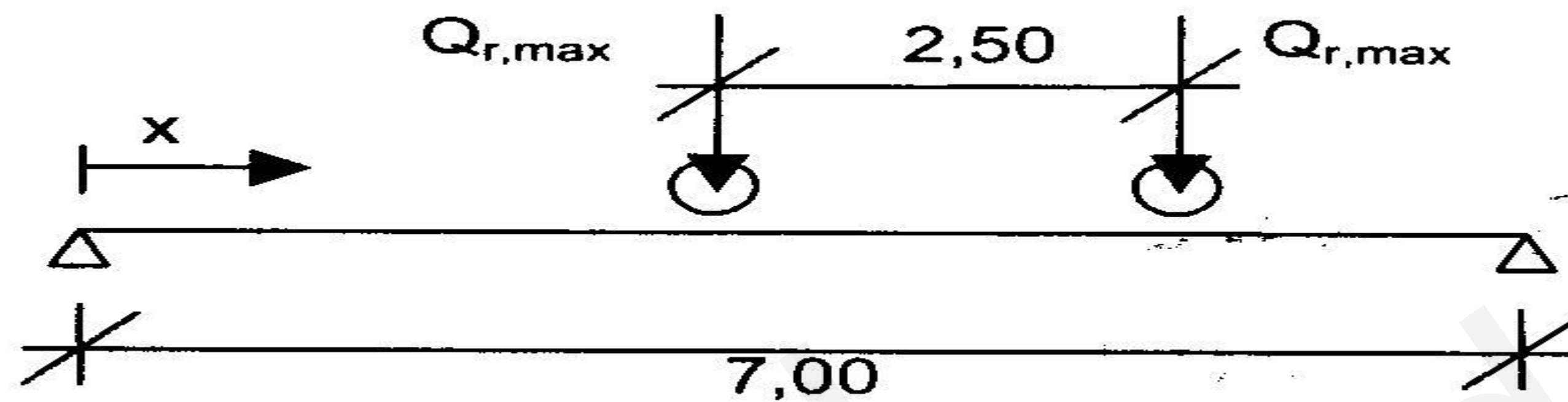


Poutre à ailes
d'épaisseur constante



Poutre à ailes
d'épaisseur variable

Exemple de calcul



Moment maximum : $x = 2,875$ m

A cette abscisse :

a) M et T dus

- aux poids propres (poutre + rail);
- aux charges verticales des galets;
- à l'accélération et à la décélération.

b) Torsion due

- aux charges verticales des galets;
- à l'accélération et à la décélération.



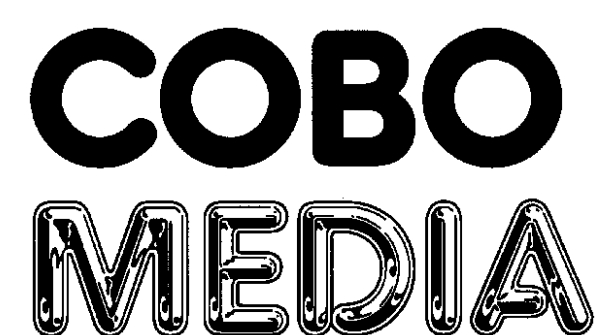
**COBO
MEDIA**



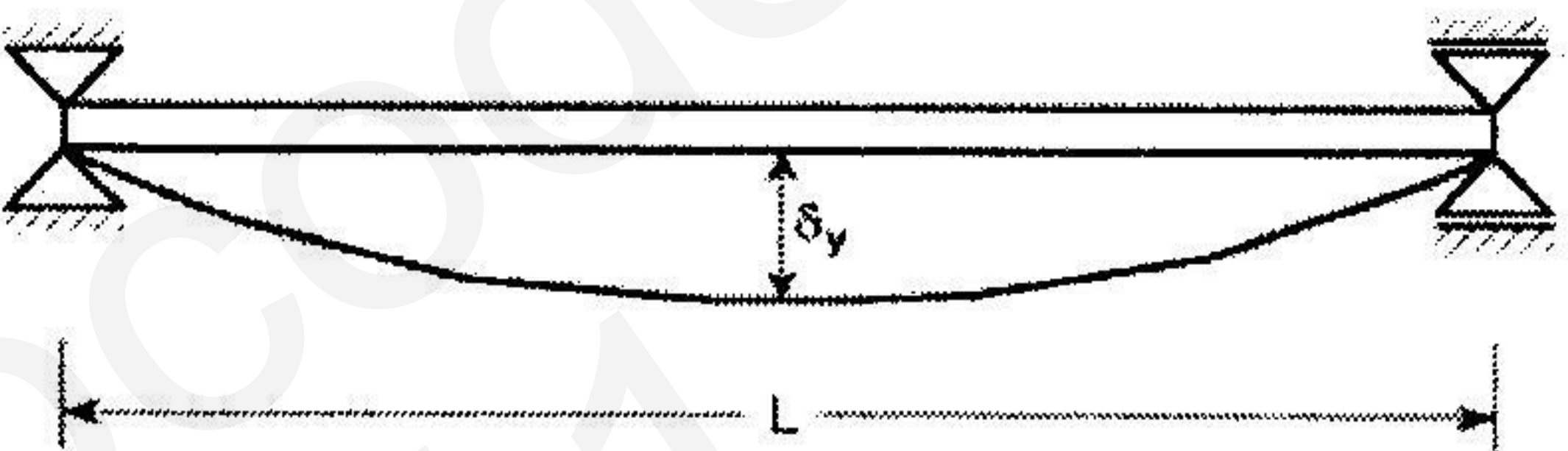
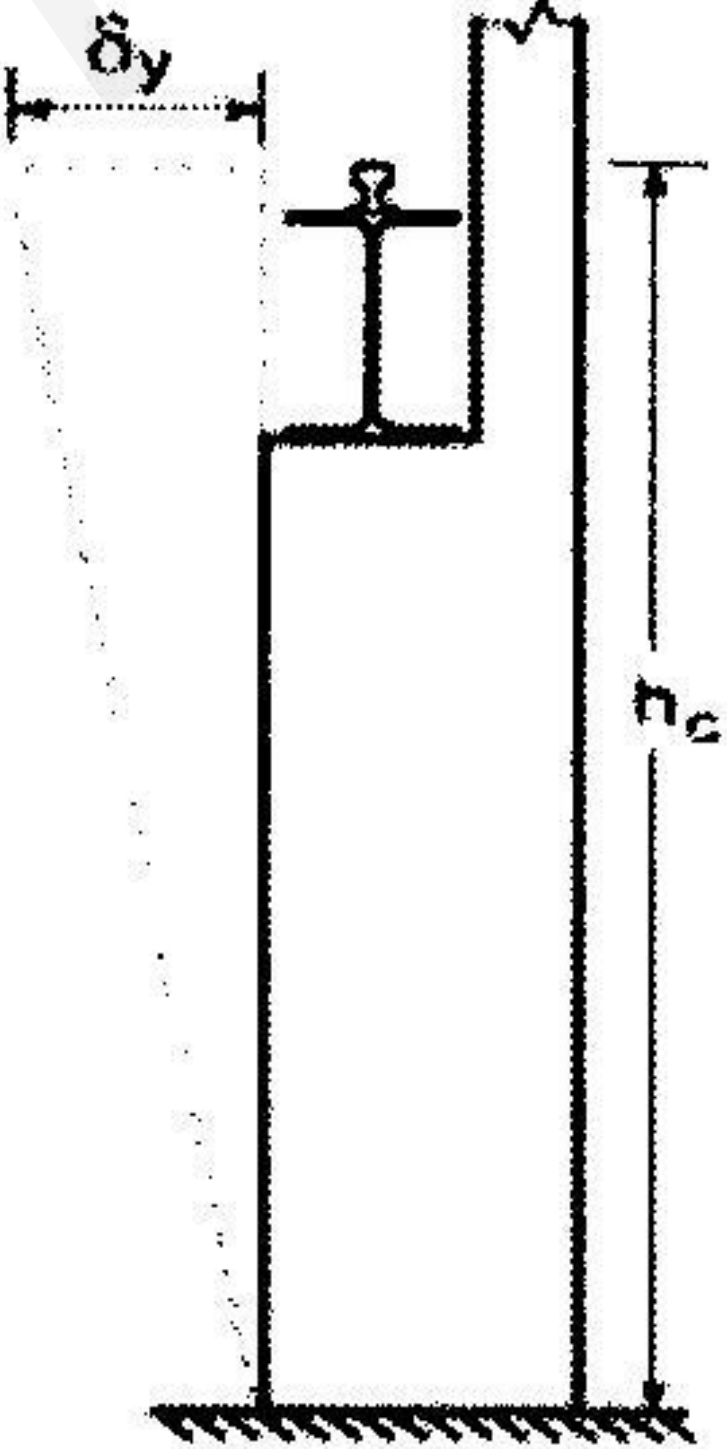
Exemple de calcul

Vérification de la section :

- cisaillement de l'âme;
- cisaillement de la semelle supérieure;
- cisaillement dû à la torsion;
- interaction : contrainte normale – cisaillement;
- flexion : plan horizontal : semelle supérieure
- flexion : plan vertical.



Valeurs limites des flèches horizontales

Description de la flèche (déformation ou déplacement)	Diagramme
<p>a) Déformation horizontale δ_y d'une poutre de roulement, mesurée au niveau de la partie supérieure du rail de pont roulant :</p> <p>$\delta_y \leq L/600$</p>	
<p>b) Déplacement horizontal δ_y d'une ossature (ou d'un poteau) au niveau de l'appui du pont roulant, provoqué par les charges de pont roulant :</p> <p>$\delta_y \leq h_c/400$</p> <p>où : h_c est la hauteur au niveau de l'appui du pont roulant (sur un rail ou sur une semelle)</p>	

Valeurs limites des flèches horizontales

c) Différence $\Delta\delta_y$ entre les déplacements horizontaux des ossatures (ou poteaux) adjacents supportant les poutres d'un chemin de roulement de pont roulant situé à l'intérieur :

$$\Delta\delta_y \leq L/600$$

d) Différence $\Delta\delta_y$ entre les déplacements horizontaux de poteaux (ou d'ossatures) adjacents supportant les poutres d'un chemin de roulement de pont roulant situé à l'extérieur :

- provoquée par la combinaison d'efforts latéraux de pont roulant et de l'action du vent de service :

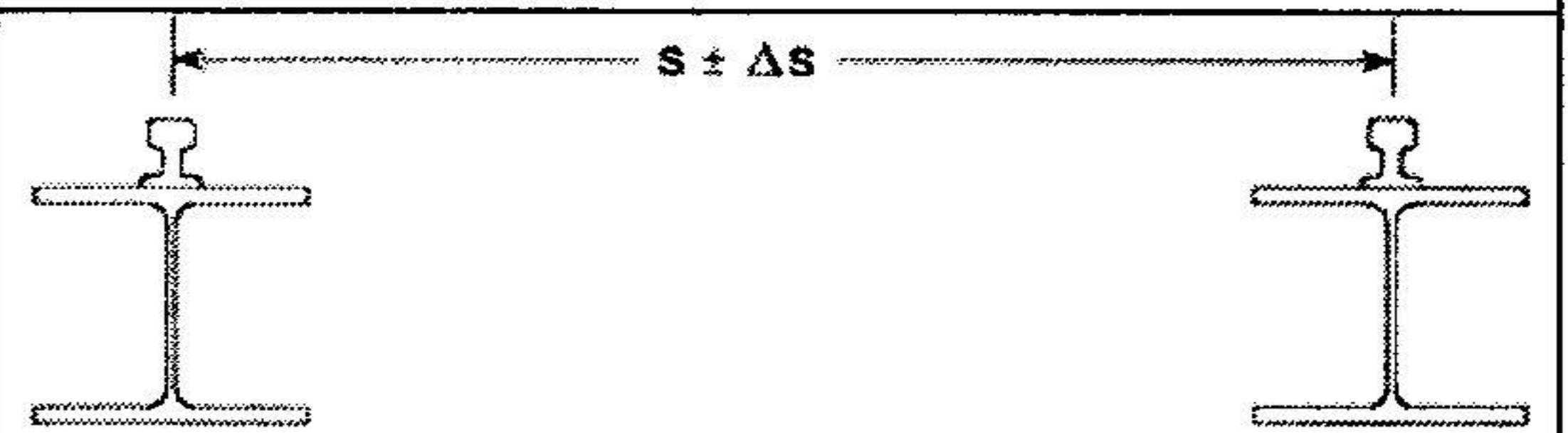
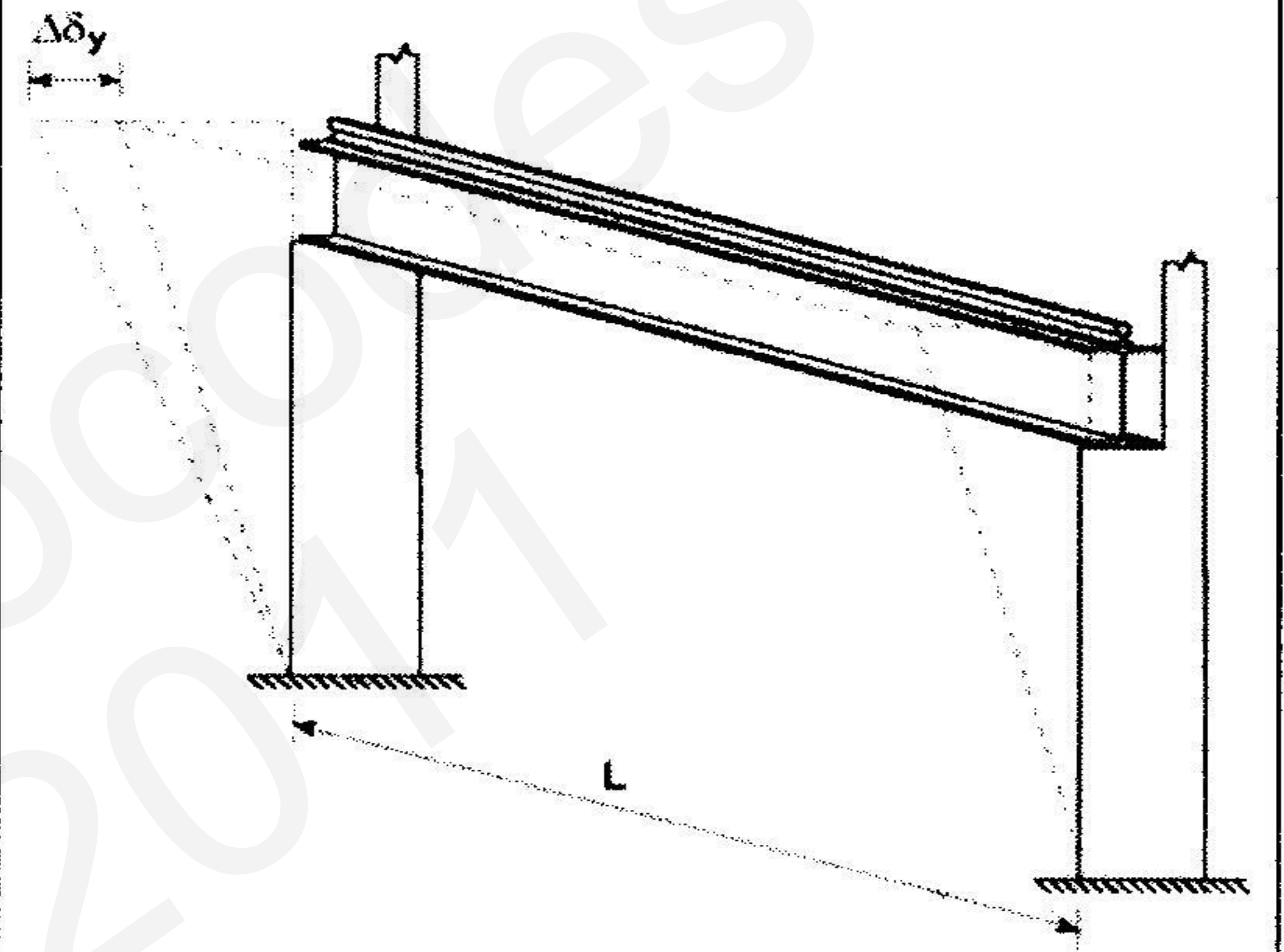
$$\Delta\delta_y \leq L/600$$

- provoquée par la charge du vent hors service

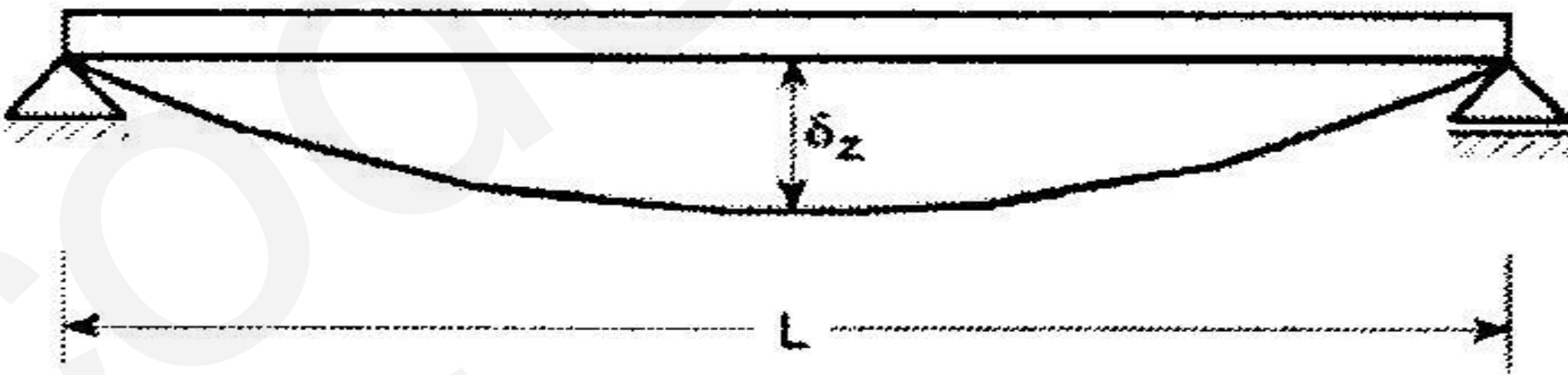
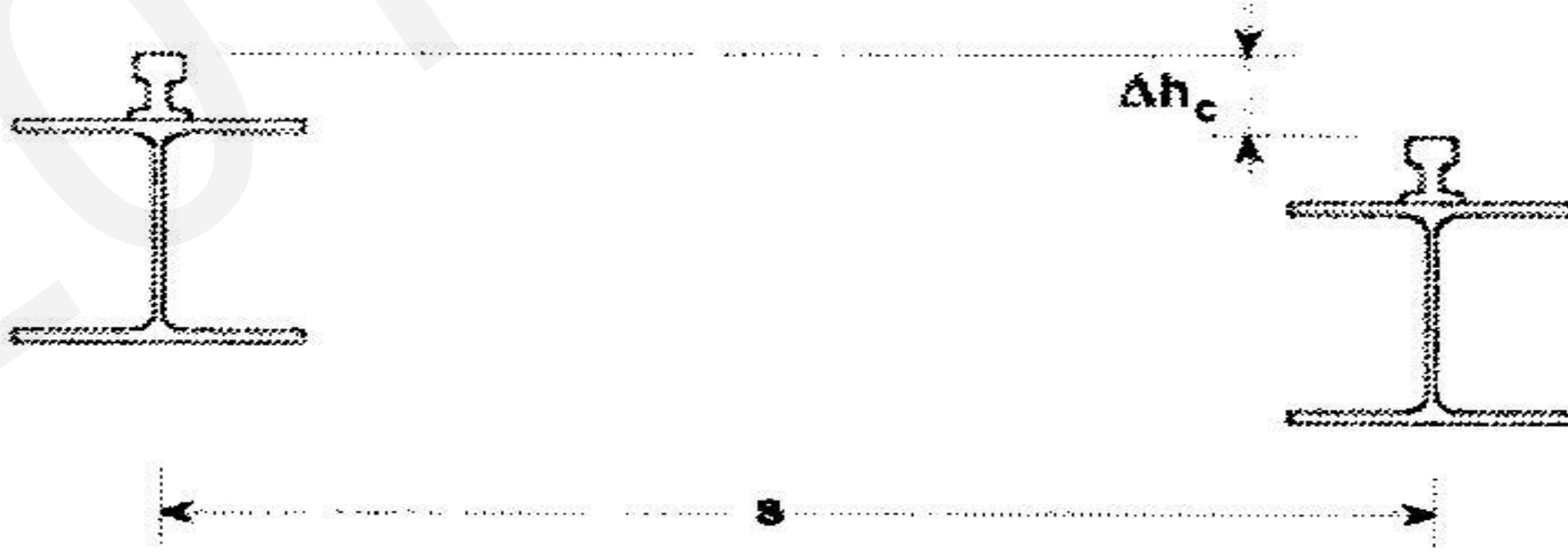
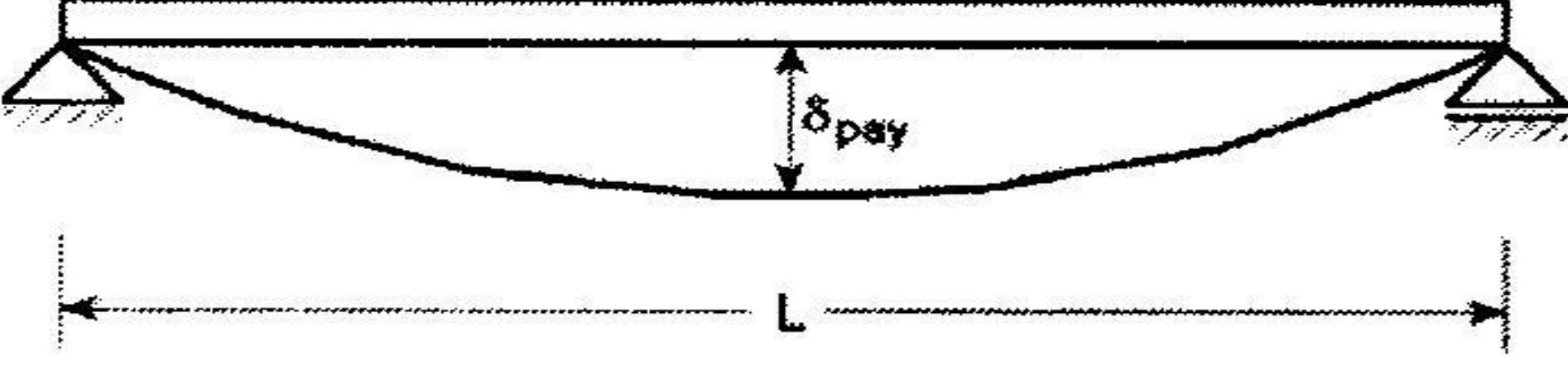
$$\Delta\delta_y \leq L/400$$

e) Modification de l'écartement Δs entre les axes de rails de pont roulant, y compris les effets des variations thermiques :

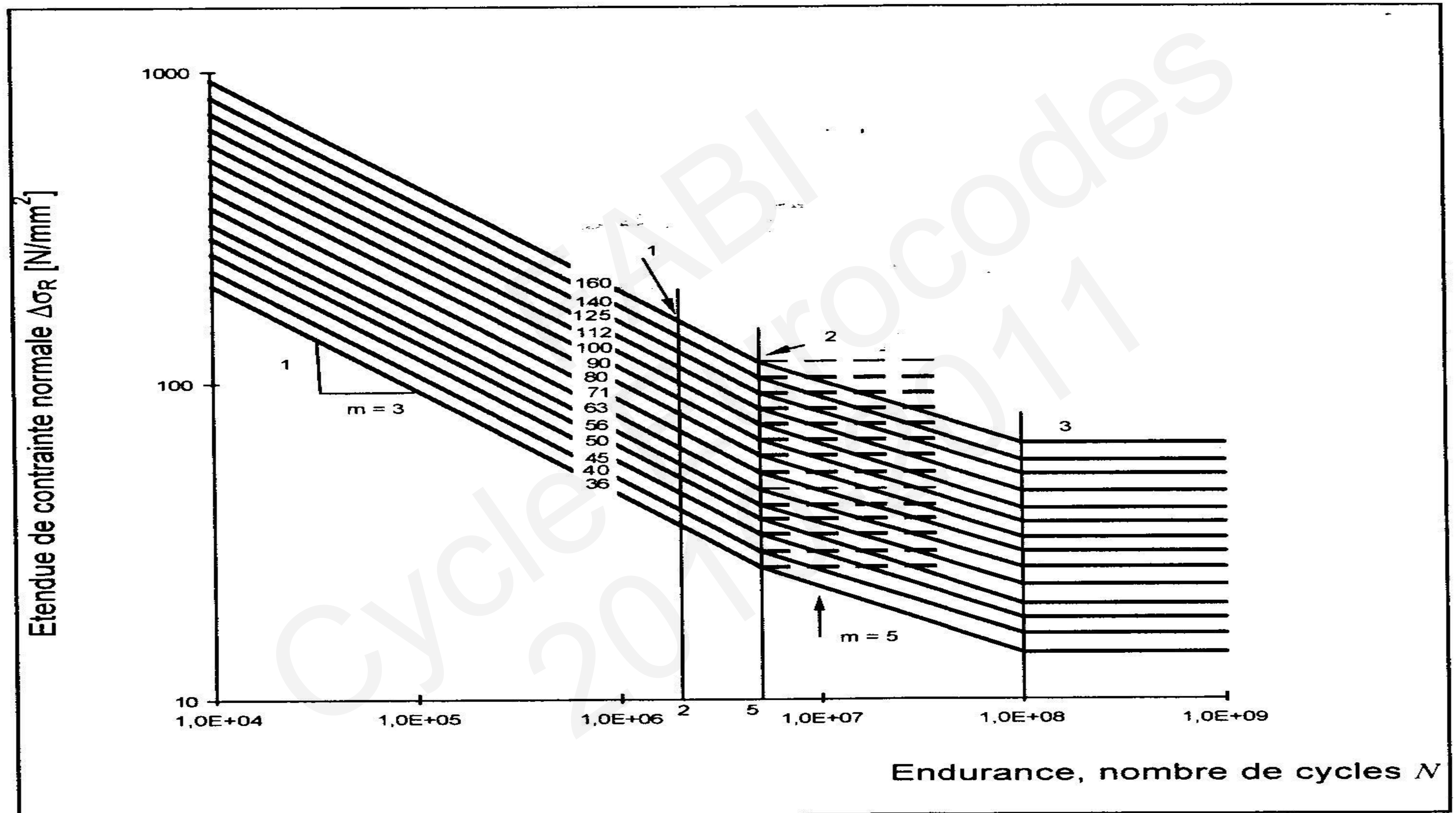
$$\Delta s \leq 10 \text{ mm} \quad [\text{voir Note}]$$



Valeurs limites des flèches verticales

Description de la flèche (déformation ou déplacement)	Diagramme
<p>a) Déformation verticale δ_z d'une poutre de roulement :</p> <p>$\delta_z \leq L/600$ et $\delta_z \leq 25$ mm</p> <p>Il convient de prendre la déformation verticale δ_z égale à la déformation totale provoquée par les charges verticales, diminuée de la contreflèche préalable, comme pour δ_{max} dans la Figure A1.1 de l'EN 1990.</p>	
<p>b) Différence Δh_c entre les déformations verticales de deux poutres formant un chemin de roulement :</p> <p>$\Delta h_c \leq s/600$</p>	
<p>c) Déformation verticale δ_{pay} d'une poutre de roulement destinée à un palan avec chariot de monorail, par rapport à ses appuis, provoquée par la seule charge utile:</p> <p>$\delta_{pay} \leq L/500$</p>	

Exemple de courbes de Wölher



Exemple de catégories de détails

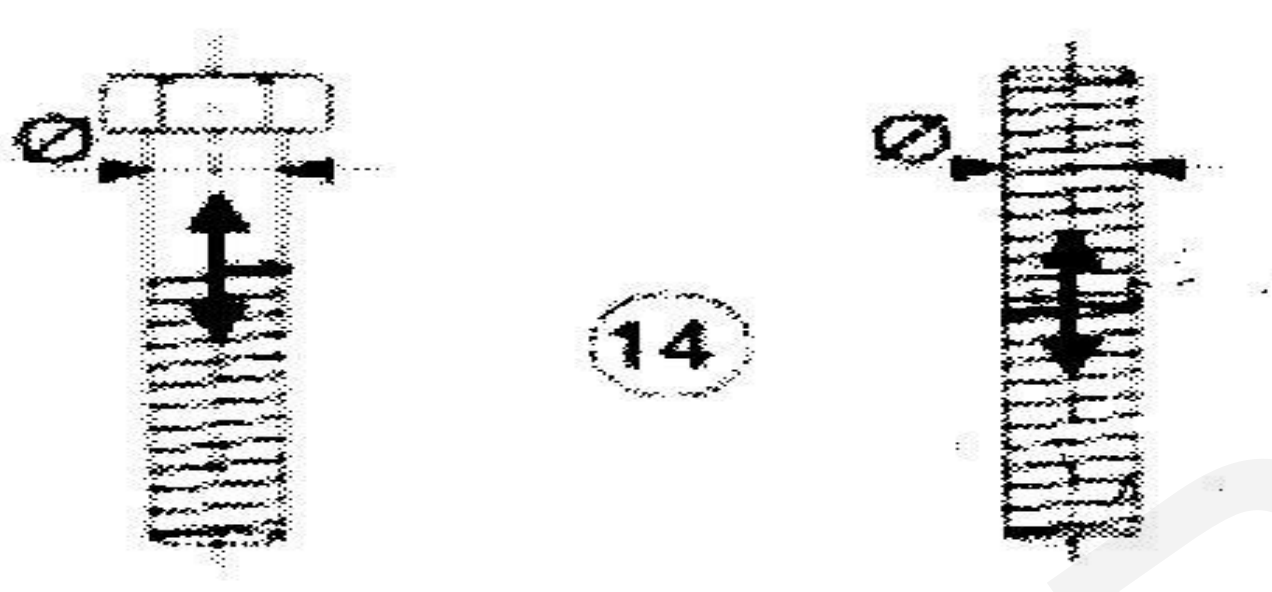
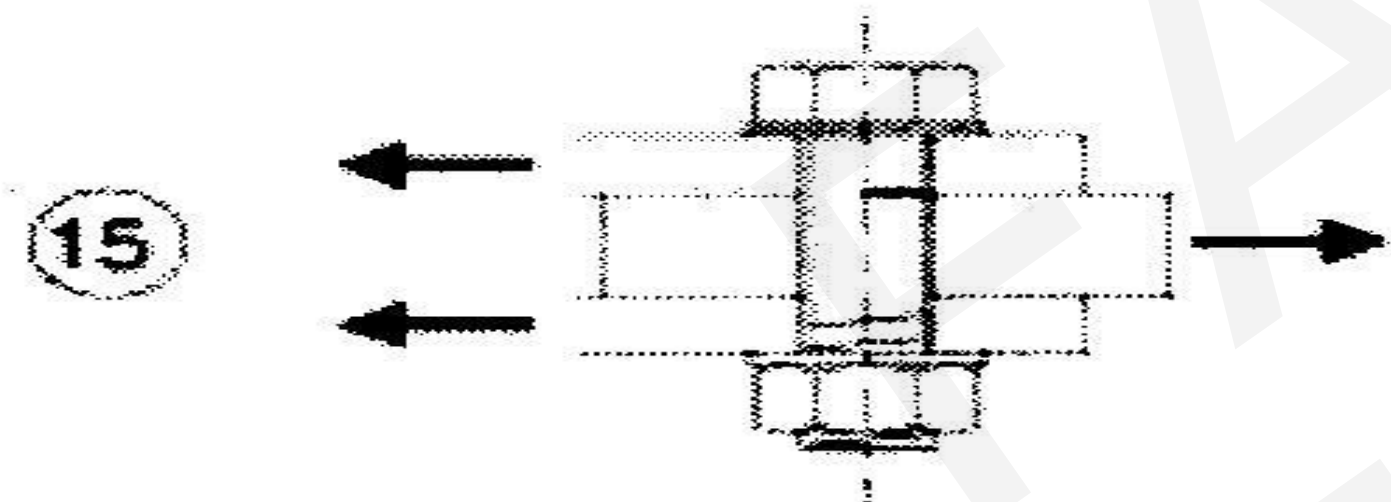
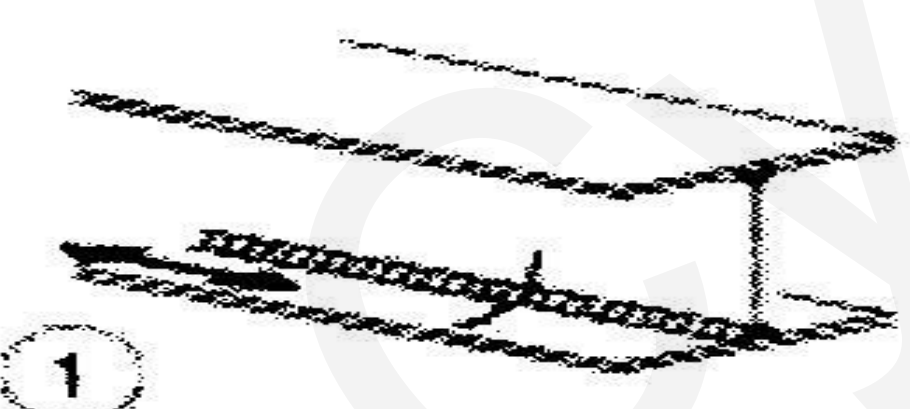
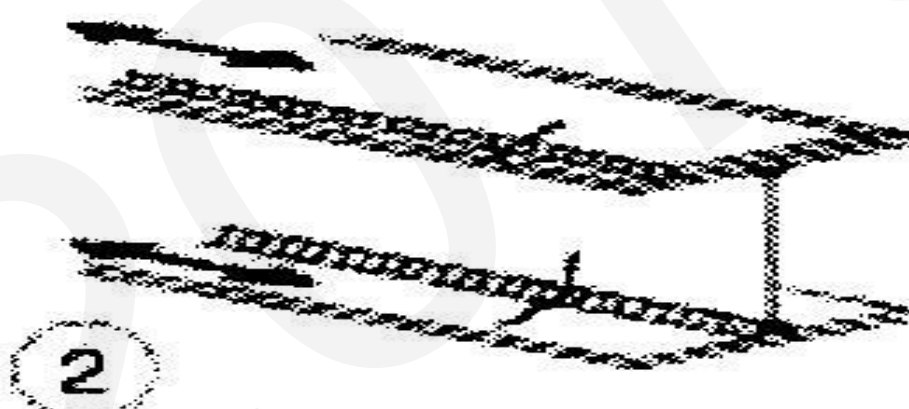

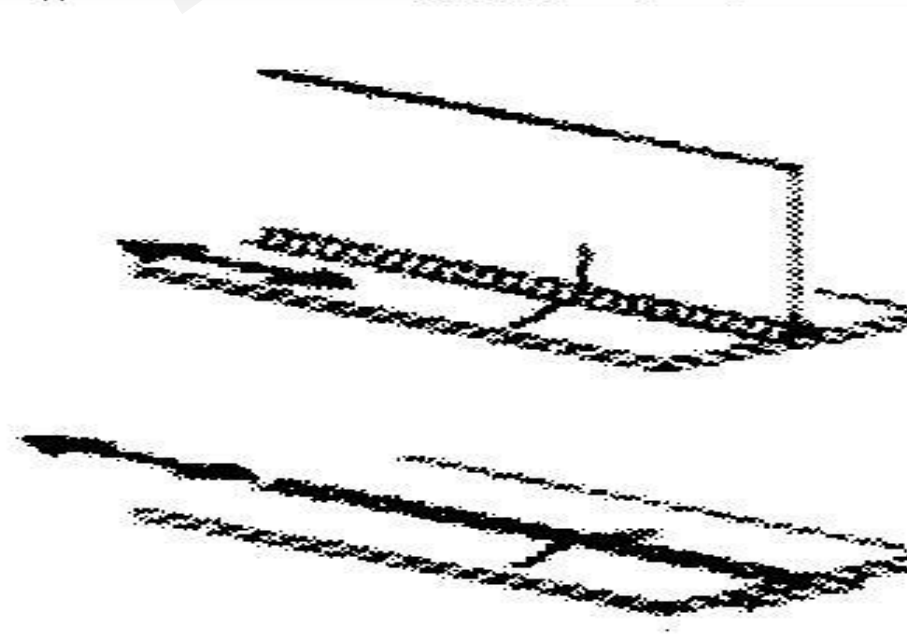
Catégorie de détail	Détail constructif		Description	Exigences
50	effet de dimension pour $\phi > 30 \text{ mm}$: $k_s = (30/\phi)^{0.25}$		14) Boulons et tiges en traction avec filets roulés ou usinés. Pour des diamètres importants (tiges d'ancrage), l'effet de dimension doit être pris en compte avec k_s .	14) $\Delta\sigma$ est à calculer par rapport à la section de la partie non filetée du boulon. La flexion et la traction provenant de l'effet de levier, et les contraintes de flexion provenant d'autres effets doivent être prises en compte. Pour les boulons précontraints, la réduction de l'étendue de contrainte peut être prise en compte.
100 $m = 5$			<u>Boulons sollicités en simple ou double cisaillement.</u> Le plan de cisaillement ne passe pas par le filetage. 15) - Boulons calibrés. - Boulons normaux sans inversion d'effort (boulons de nuance 5.6, 8.8 ou 10.9).	15) $\Delta\tau$ calculé par rapport à la section de la tige.

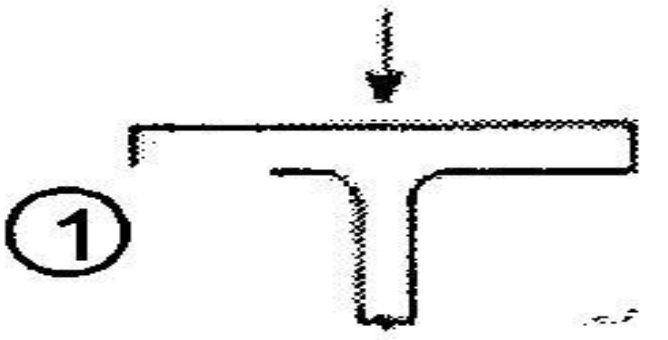

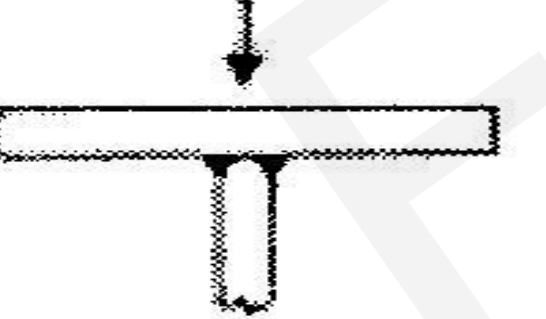
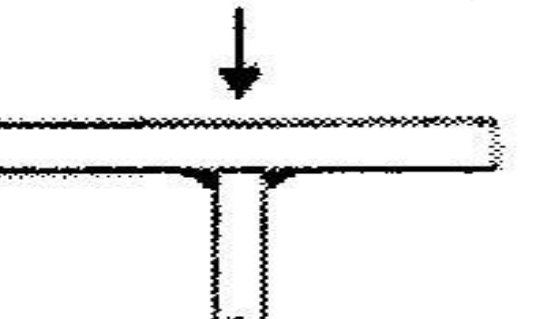
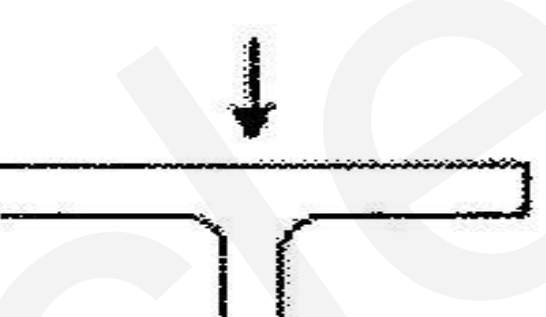
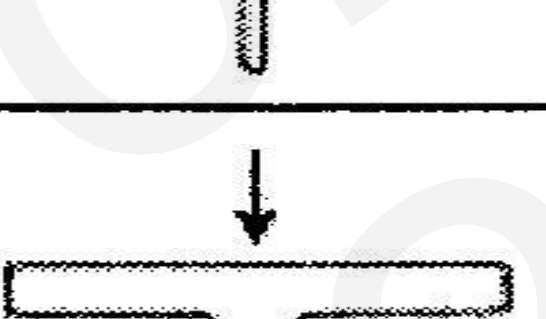
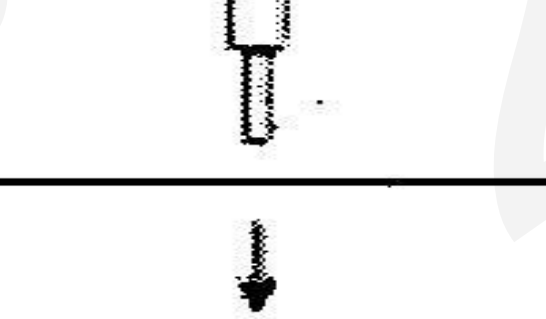
Tableau 8.2 — Profils reconstitués soudés

Catégorie de détail	Détail constructif		Description	Exigences
125			<u>Soudures longitudinales continues :</u> 1) Soudure automatique pleine pénétration exécutée des deux côtés ; 2) Soudure d'angle automatique; extrémités des plats de renfort vérifiées selon le détail 6) ou 7) du Tableau 8.5.	<u>Détails 1) et 2) :</u> Aucun arrêt/reprise n'est admis sauf si la réparation est exécutée par un spécialiste et l'exécution correcte de la réparation contrôlée par inspection.
112			3) Soudure automatique, d'angle ou pleine pénétration, exécutée des deux côtés mais avec arrêt/reprise. 4) Soudure automatique, exécutée d'un seul côté, sur une latte de soudage continue, sans arrêt/reprise.	4) Si ce détail comporte des arrêts/reprises, la catégorie 100 doit être utilisée.

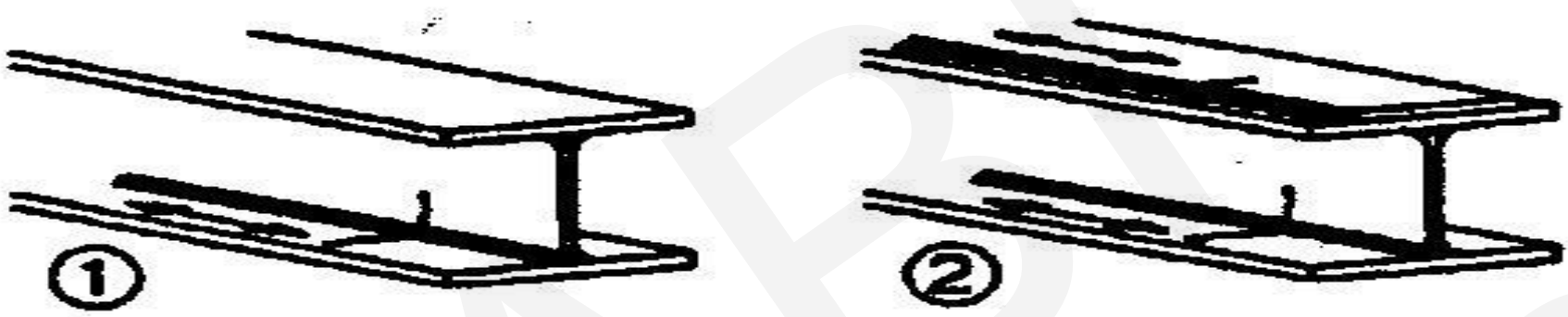
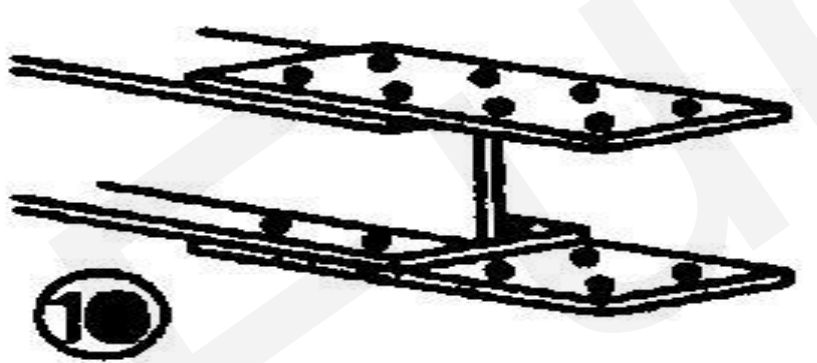
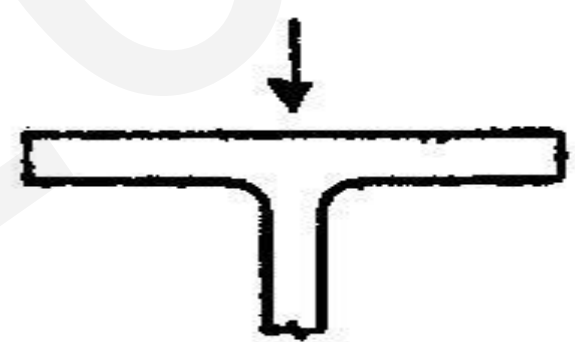


Exemple de catégories de détails – poutres de roulement

Tableau 8.10 — Liaison âme–semelle supérieure dans les poutres de roulement

Catégorie de détail	Détail constructif	Description	Exigences
160		1) Sections laminées en I ou H.	1) Etendue de contrainte verticale de compression $\Delta\sigma_{vert}$ dans l'âme due aux charges roulantes.
② 71		2) Soudure à pleine pénétration.	2) Etendue de contrainte verticale de compression $\Delta\sigma_{vert}$ dans l'âme due aux charges roulantes.
③ 36*		3) Soudure à pénétration partielle, ou soudure à pleine pénétration effective conformément à la partie 1.8.	3) Etendue de contrainte verticale de compression $\Delta\sigma_{vert}$ dans l'âme due aux charges roulantes.
④ 36*		4) Soudure par cordons d'angle.	4) Etendue de contrainte verticale de compression $\Delta\sigma_{vert}$ dans l'âme due aux charges roulantes.
⑤ 71		5) Semelle en T avec soudure à pleine pénétration.	5) Etendue de contrainte verticale de compression $\Delta\sigma_{vert}$ dans l'âme due aux charges roulantes.
⑥ 36*		6) Semelle en T avec soudure à pénétration partielle, ou soudure à pleine pénétration effective conformément à l'EN 1993-1-8.	6) Etendue de contrainte verticale de compression $\Delta\sigma_{vert}$ dans l'âme due aux charges roulantes.
⑦ 36*		7) Semelle en T avec soudure par cordons d'angle.	7) Etendue de contrainte verticale de compression $\Delta\sigma_{vert}$ dans l'âme due aux charges roulantes.

Exemple de catégories de détails – poutres de roulement

Detail category	Constructional detail	Amendments
125		Verification of normal stresses in the runway beam.
80		Verification of normal stresses in the runway beam.
80		Verification of shear stresses in the web.
160		Verification of vertical stresses in the web due to wheel loads. (Eurocode 3 - Part 6)

Exemple de calcul

A l'abscisse $x = 2,875$ m.

Vérification de la section (poids propres + charges verticales des galets :

- contraintes normales dans la semelle supérieure;
- contraintes normales dans la semelle inférieure.

Vérification de l'âme

- cisaillement dû aux
 - . aux poids propres;
 - . charges verticales des galets;
 - . charges locales sous galets.
- contraintes normales dues :
 - . aux charges verticales des galets;
 - . à la flexion.
- interaction.

