

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES DEFORMATIONS DANS LES PONTS FERROVIAIRES

Par :

L. YEZLI

Ingénieur E.N.P. - Docteur d'Etat es Sciences Appliquées U.L.B. (Belgique)

Maître de Conférence à l' E.P.A.U. (Alger)

1 INTRODUCTION

Lors de la conception des ponts ferroviaires, l'étude des déformations est en général ignorée, ou alors traitée de manière insuffisante et peu précise.

Cette lacune se justifie d'une part, par les prescriptions en vigueur trop simplistes et d'autre part par le réalisme régnant dans les bureaux d'études qui concentrent surtout leurs efforts sur les problèmes ayant trait à la résistance des ouvrages accordant ainsi peu de temps au calcul des déformations.

Lorsqu'une telle étude est entreprise, bien souvent elle se solde par une vérification du rapport $f/1$.

Les calculs sont en plus dans la majeure partie des cas relatifs au centre de gravité, négligeant ainsi les phénomènes de torsion qui se déclarent au sein de l'ouvrage. L'on est ainsi en droit de se demander dans quels cas ceux-ci peuvent réellement être ignorés.

Un premier objectif de cette recherche consiste à établir un mode de calcul qui, en tenant compte des effets de torsion - les calculs sont donc faits par rapport au centre de cisaillement de la section transversale du tablier - permet d'évaluer l'ensemble des déformations générées dans un pont ferroviaire chargé.

Un second objectif, traité dans un prochain article, qui constitue une finalité concrète de ce travail est l'établissement d'un projet de recommandations où l'on stipule les déformations admissibles dans les ponts ferroviaires.

Avant d'aborder le projet de recommandations, il est essentiel de définir au préalable, parmi les nombreuses déformations d'un ouvrage, celles qui sont susceptibles d'être touchées par d'éventuelles limitations.

En effet, en tenant compte du développement actuel des réseaux où l'on enregistre de plus en plus de lignes à très grande vitesse, pourrait-on toujours se contenter d'une simple vérification du rapport $f/1$, de la flèche sur la portée, ou au contraire, y a-t-il lieu d'étendre les limitations à d'autres déformations ?

Dans ce premier article, nous allons définir les principaux paramètres propres à la théorie de la

torsion ainsi que la présentation de la modélisation du tablier d'un pont ferroviaire en vue de l'étude en torsion.

2 LES DEFORMATIONS DANS LES PONTS FERROVIAIRES

2.1 Notations et conventions

Soit une travée de portée l_i et de biais δ_k et δ_{k+1} (fig. 2.1).

Les axes de coordonnées Ox et Oy sont parallèles au plan de la section droite de la travée. Pour que les charges et les déformations de flexion dues à la gravité soient positives, nous convenons d'orienter l'axe Oy vers le bas ; l'axe Oz est longitudinal et est orienté conformément à la figure 2.1. La figure 2.1 montre également les conventions de signes adoptées pour l'angle de biais δ et le décalage des appareils d'appuis e .

La figure 2.2 indique quant à elle les conventions de signes adoptées pour les moments de torsion T , m_D et M_D

et la rotation ϕ du tablier.

On a :

T = moment de torsion intérieur (T_S : en torsion de Saint-Venant, T_W : en torsion non-uniforme et $T (=T_S + T_W)$: en torsion mixte) ;

m_D = moment de torsion extérieur uniformément réparti ;

M_D = moment de torsion extérieur concentré.

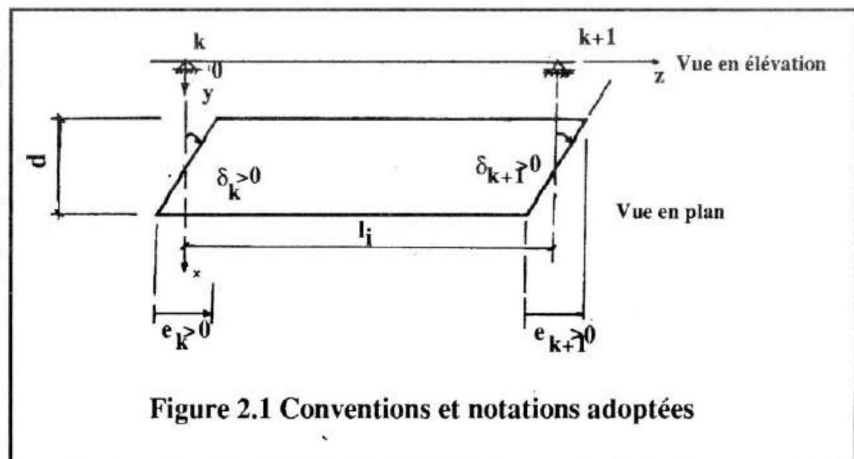


Figure 2.1 Conventions et notations adoptées

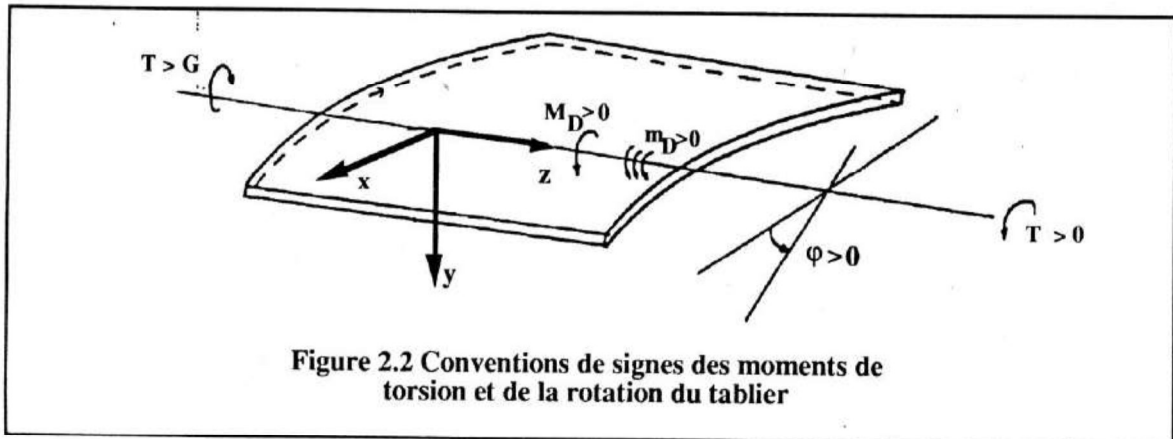


Figure 2.2 Conventions de signes des moments de torsion et de la rotation du tablier

2.2 Paramètres propres à la théorie de la torsion

2.2.1 Caractéristiques sectorielles

Les caractéristiques sectorielles définissent le gauchissement des sections ; elles correspondent à celles données par V. Z. VLASSOV (1) et V. FEODOSSIEV (2).

a) Section ouverte :

- Aire sectorielle :

La détermination de l'aire sectorielle nécessite la définition préalable de 2 points : un pôle (P) et une origine des coordonnées curvilignes (A) (voir fig. 2.3).

On a ainsi :

$$\omega = \int_s h \, ds \quad (2.1)$$

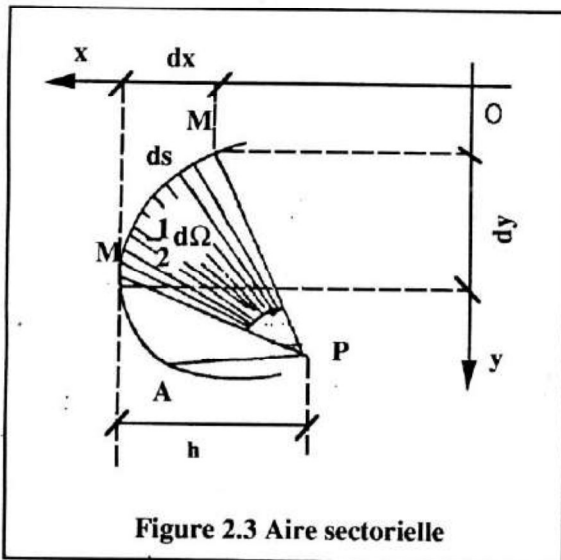


Figure 2.3 Aire sectorielle

- Moment statique sectoriel :

$$\tilde{S}_\omega = \int_F \omega \, dF \quad (2.2)$$

Nous avons admis ici la systématique introduite par F.W. BORNSCHEUER, cité par C.F. KOLLBRUNNER (3),

selon laquelle les intégrales de surfaces portent en indice les symboles des coordonnées qui interviennent sous le signe d'intégration. En outre, si une grandeur qui dépend des coordonnées de base n'est pas une caractéristique constante, le symbole désignant la grandeur est surmonté d'un tilde.

- Moments centrifuges sectoriels - Moment d'inertie sectoriel :

Outre les variables $x, y, \tilde{S}_x, \tilde{S}_y$ classiques, on introduit 2 variables sectorielles ω et \tilde{S}_ω .

Parallèlement à ces 6 variables apparaissent 6 constantes qui sont les intégrales de surfaces relatives à tous les produits possibles de 2 coordonnées à savoir :

$$I_{xx}, I_{xy}, I_{yy}, I_{x\omega}, I_{y\omega} \text{ et } I_{\omega\omega}$$

$I_{x\omega}$ et $I_{y\omega}$ qui sont les moments centrifuges sectoriels, sont définis par les intégrales suivantes :

$$I_{x\omega} = \int_F x \omega \, dF \quad (2.3)$$

$$I_{y\omega} = \int_F y \omega \, dF \quad (2.4)$$

$I_{\omega\omega}$ est le moment d'inertie sectoriel ; il est défini par la formule :

$$I_{\omega\omega} = \int_F \omega \omega \, dF \quad (2.5)$$

b) Section fermée :

Les caractéristiques sectorielles d'une section fermée ont été définies par des auteurs russes dont RUTECKI, URBAN et WEISS, cités par G. KLIMINSKI (4).

L'aire sectorielle est donnée par l'expression suivante :

$$\tilde{\omega} = \omega - 2A \frac{\int_s ds / G}{\oint ds / G \delta} \quad (2.6)$$

où :

ω = aire sectorielle définie pour le même profil supposé

ouvert.

A = aire comprise à l'extérieur de la ligne moyenne du Les autres caractéristiques ont les mêmes formulations que celles des profils ouverts.

2.2.2 Centre de cisaillement

a) Section ouverte :

le centre de cisaillement (D) d'une section est caractérisé par le fait que lorsqu'il contient les lignes d'action des efforts tranchants, la flexion n'est pas accompagnée de torsion. La relation entre la position d'une charge P et du centre de cisaillement D apparaît à la figure (2.4).

Pour déterminer analytiquement la position du centre de cisaillement, il est nécessaire de définir au préalable un point de référence. Soit C le centre de gravité, ce point. Les coordonnées x_D et y_D du centre de cisaillement s'expriment par :

$$\begin{aligned} x_D &= -1/D \{ I_{xx} \int_s \tilde{S}_y h_c ds - I_{xy} \int_s \tilde{S}_x h_c ds \} \\ y_D &= 1/D \{ I_{yy} \int_s \tilde{S}_x h_c ds - I_{xy} \int_s \tilde{S}_y h_c ds \} \end{aligned} \quad (2.7)$$

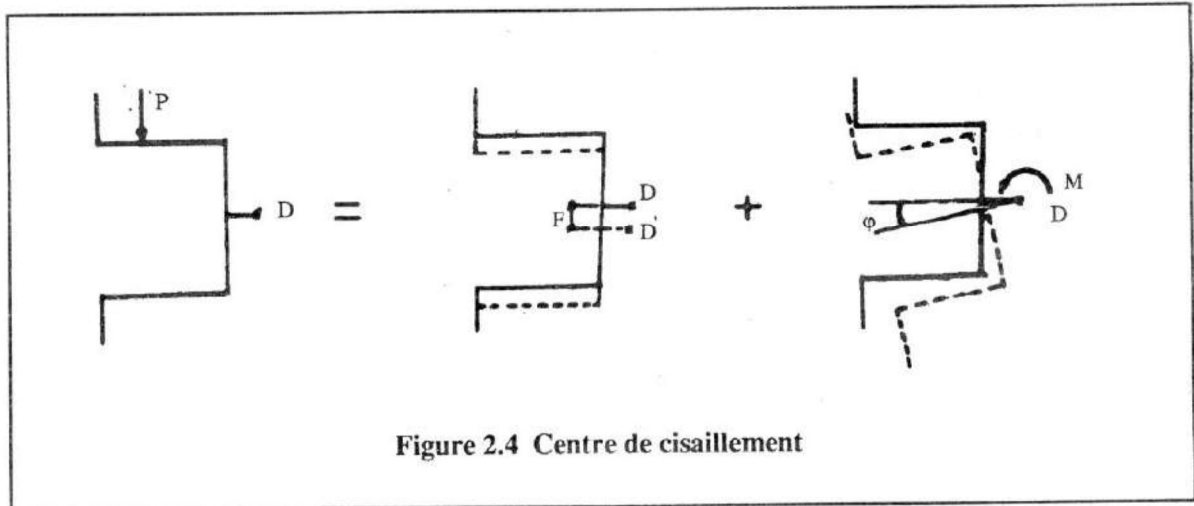


Figure 2.4 Centre de cisaillement

où :

$$D = \sqrt{I_{xx} I_{yy} - I_{xy}^2}$$

b) Section fermée :

Les coordonnées du centre de cisaillement se déterminent en deux étapes :

- 1°) établir les coordonnées x_{D0} et y_{D0} de la section ouverte en utilisant les formules (2.7);
- 2°) déterminer les coordonnées Δx_D et Δy_D qui résultent des moments de torsion introduits par les flux surabondants dans les cellules.

Dans le cas général d'une section tubulaire à n cellules, les coordonnées du centre de cisaillement s'expriment par :

$$x_D = + \int_s q_0 (Q_y=1) h_c ds + \sum_{i=1}^n q_i (Q_y=1) \int_i h_c ds \quad (2.8 a)$$

$$y_D = - \int_s q_0 (Q_x=1) h_c ds - \sum_{i=1}^n q_i (Q_x=1) \int_i h_c ds \quad (2.8 b)$$

avec :

$$q_0 = - \frac{I_{yy} \tilde{S}_x - I_{xy} \tilde{S}_y}{D} Q_x - \frac{I_{xx} \tilde{S}_y - I_{xy} \tilde{S}_x}{D} Q_y \quad (2.9)$$

où :

q_0 désigne le flux de cisaillement engendré dans la section ouverte (système fondamental) et q_i représente le flux surabondant.

Q_x et Q_y sont les composantes des efforts tranchants qui sont parallèles respectivement aux axes x et y.

3 MODELISATION DU TABLIER D'UN PONT FER ROVIAIRE EN VUE DE L'ETUDE EN TORSION

3.1 Modélisation de la section transversale

La section réelle d'un tablier est constituée par un ensemble continu de sections élémentaires de formes quelconques, homogènes ou mixtes acier-béton.

La modélisation consiste à substituer à cette section, d'une réalité complexe, une autre section, fictive, mais plus accessible au calcul.

Une section élémentaire réelle apparaît dans le modèle :

- soit comme un élément mince, représenté alors par sa ligne moyenne ;
- soit comme un point, qui désigne alors une surface concentrée.

Chaque élément du modèle est caractérisé par son aire - qui est celle de la section élémentaire qu'il représente - et par les coordonnées de ses extrémités par rapport à une origine quelconque.

La surface concentrée est considérée comme un élément fictif de dimensions nulles et dont les extrémités sont par

conséquent confondues. L'introduction de surfaces concentrées dans la modélisation permet de simplifier grandement la forme du modèle. La modélisation de la section transversale est évidemment d'autant plus précise que les dimensions des éléments qui la composent sont réduites.

Cette modélisation est complétée par les hypothèses suivantes :

- 1°) le béton est supposé homogène et non fissuré ;
- 2°) la densité et les modules d'élasticité (E) et de glissement (G) sont supposés constants ;
- 3°) nous admettons enfin qu'il n'y a aucun glissement entre l'acier et le béton.

3.2 Caractéristiques géométriques de la section transversale

En respectant les hypothèses énoncées dans le paragraphe précédent et selon la systématique de modélisation qui y est introduite, nous obtenons un modèle de section représentatif de la section réelle.

Nous désignons le centre d'un élément par i (nombre pair) et les extrémités par les lettres k et $k+1$ (nombres impairs).

Pour le calcul des déformations d'un tablier, soumis à une charge quelconque, il est nécessaire de déterminer les 6 variables suivantes :

$$x, y, \omega, \tilde{S}_x, \tilde{S}_y \text{ et } \tilde{S}_\omega$$

en $(2n+1)$ points de la section (n = nombre d'éléments qui composent la section).

Il faut en outre déterminer les 6 constantes suivantes :

$$I_{xx}, I_{yy}, I_{\omega\omega}, I_{xy}, I_{x\omega_c}, I_{y\omega_c}$$

Afin de déterminer ces caractéristiques, nous utilisons les 4 tableaux ci-après qui constituent un procédé de calcul méthodique et facilement programmable.

Les données du problème sont :

1°) les aires ΔF_i des différents éléments qui constituent la section modélisée ;

2°) les coordonnées des extrémités x_k et y_k relatives à

l'origine O d'un système de coordonnées quelconque.

L'étude est faite pour une section transversale de forme quelconque : elle peut être ouverte ou fermée.

La section ouverte peut être composée d'un ou plusieurs tronçons dont un tronçon principal et un ou plusieurs tronçons secondaires.

La section fermée peut présenter une ou plusieurs cellules.

3.3 Paramètre χ (khi)

Ce paramètre est une fonction de la rigidité à la torsion de Saint-Venant et de la rigidité à la torsion non-uniforme. Il permet de définir les plages de valeurs pour lesquelles l'une de ces 2 torsions peut être considérée comme négligeable par rapport à l'autre et celles où elles ne le sont pas. Dans ce dernier cas la travée est sollicitée en torsion mixte.

Tableau 3.1

N° des équations et des colonnes	(a)	(x ₁)	(x ₂)	(x ₃)	(x ₄)	(x ₅)	(x ₆)	(x ₇)	(x ₈)	(Y ₁)	(x ₉)
Notations	$\Delta F/4$	ΔX_i	X_k	$\Delta S_x/2$	x	ΔS_x	\tilde{S}_x	$\tilde{S}_{xk}+4\tilde{S}_{xi}+\tilde{S}_{xk+1}$	I_{xxi}	ΔY_i	I_{xyi}

Tableau 3.2

N° des équations et des colonnes	(a)	(Y ₁)	(Y ₂)	(Y ₃)	(Y ₄)	(Y ₅)	(Y ₆)	(Y ₇)	(Y ₈)	(x ₁)	(Y ₉)
Notations	$\Delta F/4$	ΔY_i	Y_k	$\Delta S_y/2$	Y	ΔS_y	\tilde{S}_y	$\tilde{S}_{yk}+4\tilde{S}_{yi}+\tilde{S}_{yk+1}$	I_{yyi}	ΔX_i	I_{yxi}

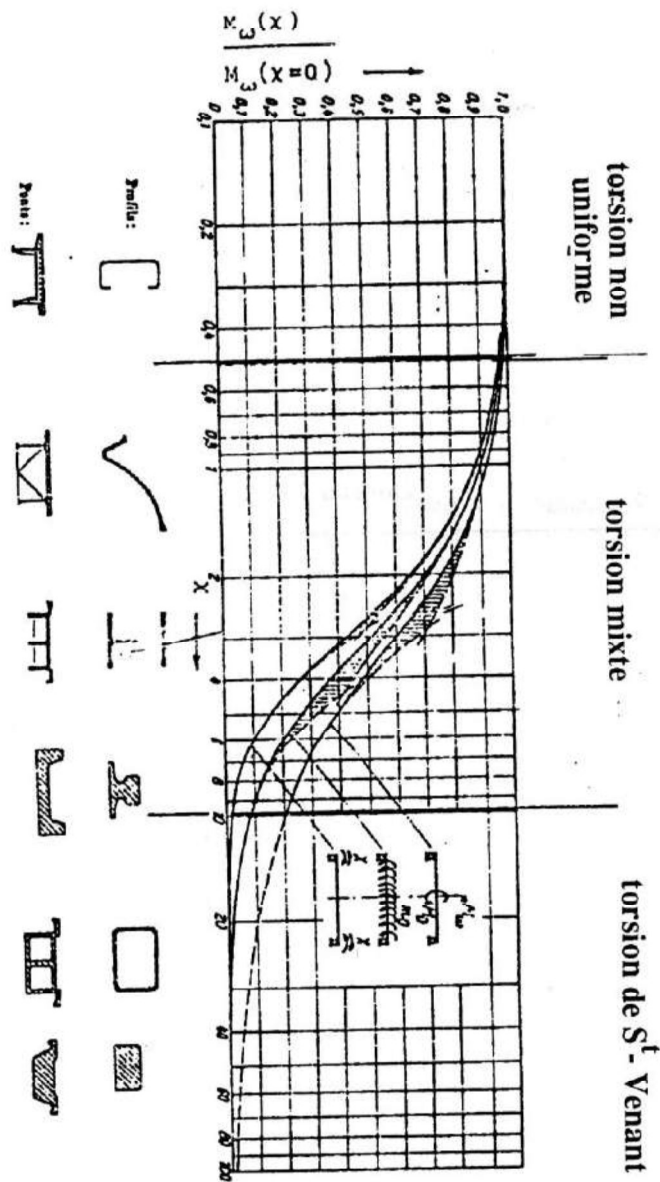
Tableau 3.3

N° des équations et des colonnes	(x ₄)	(Y ₁)	(Y ₄)	(x ₁)	$\Delta\omega_{Ci}$	(x ₇)	(x ₁₀)	(Y ₇)	(Y ₁₀)	(ω_1)
Notations	x_i	ΔY_i	Y_i	ΔX_i	$x_i \Delta Y_i - y_i \Delta X_i$	$\tilde{S}_{xk}+4\tilde{S}_{xi}+\tilde{S}_{xk+1}$	$I_{x\omega Ci}$	$\tilde{S}_{yk}+4\tilde{S}_{yi}+\tilde{S}_{yk+1}$	$I_{y\omega Ci}$	$\Delta\omega_i$

Tableau 3.4

N° des équations et des colonnes	(a)	(ω_1)	(ω_2)	(ω_3)	(ω_4)	(ω_5)	(ω_6)	(ω_7)	(ω_8)	(x ₁)	(ω_9)	(Y ₁)	(ω_{10})
Notations	$\Delta F/4$	$\Delta\omega_i$	ω_k	$\Delta S_\omega/2$	ω	$\Delta S_{\omega i}$	$\tilde{S}_{\omega i}$	$\tilde{S}_{\omega k}+4\tilde{S}_{\omega i}+\tilde{S}_{\omega k+1}$	$I_{\omega\omega i}$	ΔX_i	$I_{x\omega i}$	ΔY_i	$I_{y\omega i}$

Figure 3.1 Bimoments M_{ω} en fonction du paramètre χ pour trois cas de charge différents



Ce paramètre est donné par la relation suivante :

$$\chi = \sqrt{\frac{G K l^2}{E I_{\omega\omega}}} \quad (3.1)$$

où :

- l = portée de la travée envisagée
- K = constante de torsion de Saint-Venant
- $I_{\omega\omega}$ = moment d'inertie sectoriel

E et G = modules de Young et de glissement.

3.4 Modélisation du tablier

Cette théorie s'applique à des ouvrages ayant une ou plusieurs travées, isostatiques ou continues, droites ou biaisées. En outre, chacune d'elles peut présenter indifféremment une section constante ou variable.

Les tabliers doivent toutefois satisfaire aux deux conditions suivantes :

- 1°) être étroits ;
- 2°) les décalages e_k et e_{k+1} (voir fig 3.2) de leurs appareils d'appuis doivent être faibles vis-à-vis de leur portée.

Sur la base de ces deux hypothèses, il apparaît que les travées sont plutôt de concept "poutres" ; nous modélisons donc une travée ou une suite de plusieurs poutres, isostatiques ou continues, en une poutre ou une suite de plusieurs poutres, isostatiques ou continues. Nous supposons en outre qu'au droit de chaque appui k la rotation ϕ_k est nulle et que les extrémités des poutres ne sont pas libres de gauchir.

Notons que la seconde condition ci-dessous permet surtout une facilité de calcul : les intégrales qui interviennent dans les calculs des différents coefficients qui caractérisent chaque travée peuvent être étendues à toute la portée.

Les caractéristiques géométriques de la poutre qui modé-

lise chaque travée sont celles de la section transversale. Elles sont déjà définies aux paragraphes précédents.

Nous supposons de plus que l'axe de cette poutre fictive coïncide avec la ligne des centres de cisaillement des sections transversales de la travée.

La figure (3.2) montre un exemple d'une travée avec son modèle.

3.5 Sollicitations

Dans les cas courants, ces ouvrages sont soumis aux charges verticales seules. Cela réduit le nombre total des inconnues hyperstatiques.

Sous de telles charges, la structure est généralement soumise à la flexion et à la torsion.

Le tablier est ainsi sollicité par les actions directes qui sont les charges et surcharges à envisager dans les calculs.

La modélisation du tablier tient compte des conséquences de la translation e_D de l'axe du convoi ferroviaire vers la ligne des centres de cisaillement.

La poutre modélisant la travée est donc, en vertu des lois de la Mécanique, sollicitée par 2 efforts (en général) :

- 1°) une charge uniformément répartie p ,
- 2°) un moment de torsion uniformément répartie m_D ,

tel que :

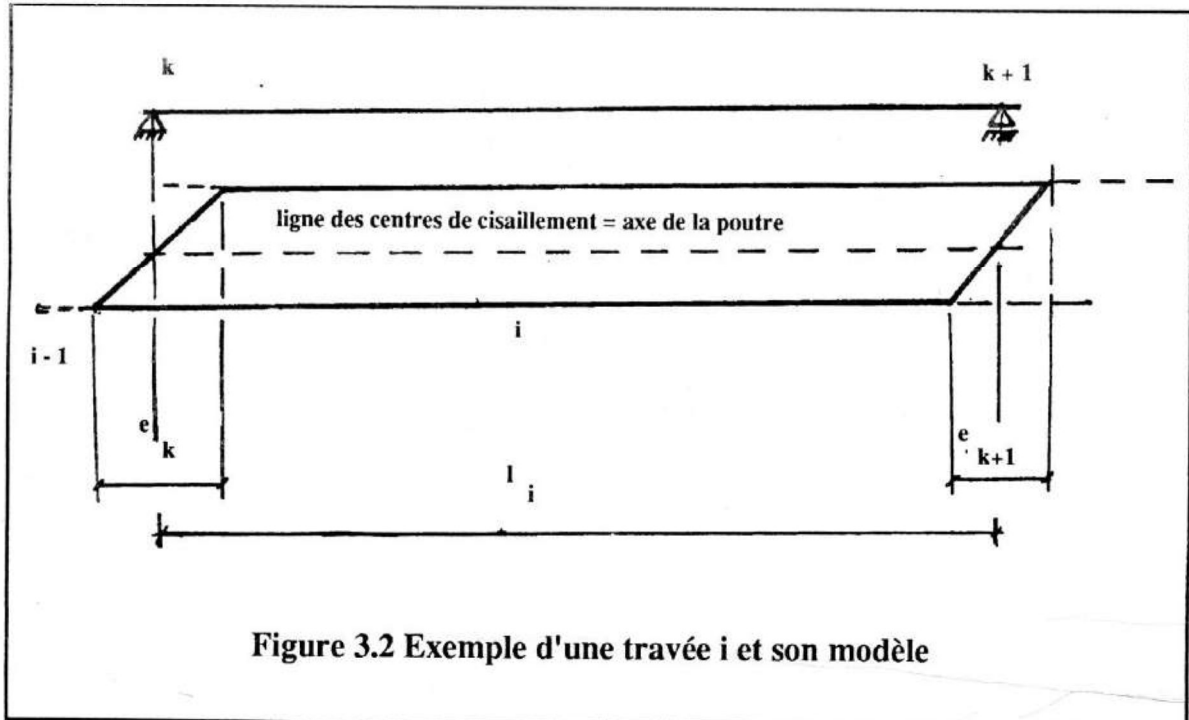
$$m_D = p e_D \quad (3.2)$$

m_D doit être pris avec son signe conformément aux conventions adoptées au § 2.

Cette décomposition est représentée à la figure 3.3 où le centre de cisaillement de la section est désigné par D .

Remarque

Lorsque la travée est biaisée, il faut tenir compte des conséquences qui résultent de cette particularité. En effet, la charge et le moment de torsion uniformément répartis qui sollicitent en général la travée vont générer du fait du biais des efforts intérieurs à ses extrémités. Par conséquent, la



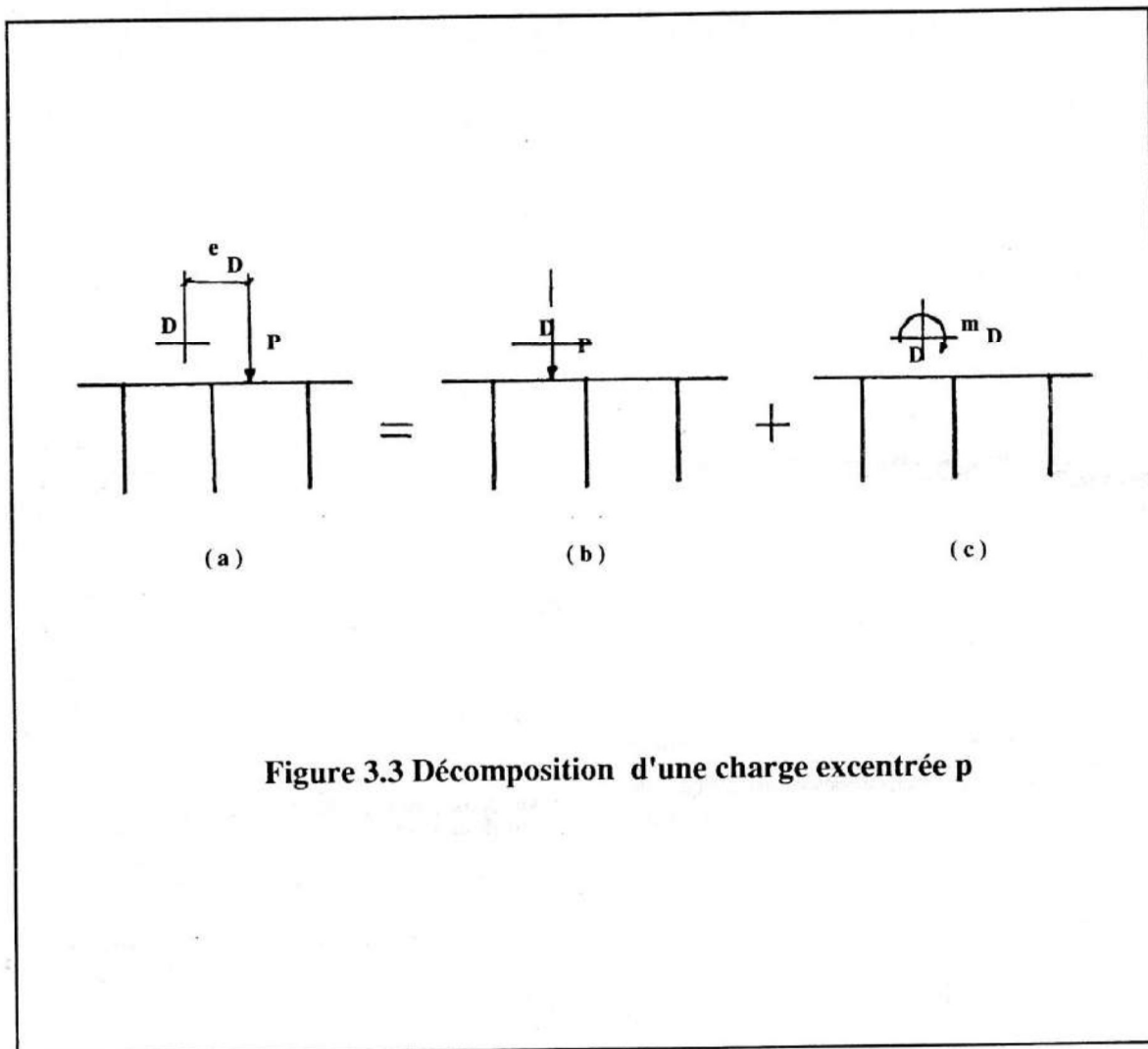


Figure 3.3 Décomposition d'une charge excentrée p

modélisation d'une travée biaisée serait incomplète si nous omettons de tenir compte de ces efforts. Ces derniers seront appliqués aux extrémités de la poutre qui modélise la travée.

4 CONCLUSION

Dans ce premier article, nous avons défini les principales caractéristiques qui interviennent dans la théorie de la torsion appliquée à des tabliers de ponts ferroviaires.

Sur cette base, dans un prochain article, nous présenterons l'essentiel de la théorie développée pour la détermination des efforts intérieurs et des déformations d'un tablier sollicité par un convoi ferroviaire.

Un schéma de calcul de la méthode sera communiqué.

5 BIBLIOGRAPHIE

- 1) V.Z. VLASSOV "Thin-Walled Elastic Beams" for Scientific Translations, 1961.
- 2) V. FEODOSSIEV "Résistance des Matériaux". 3e ed. (1976) Ed. Mir, Moscou.
- 3) C.F. KOLLBRUNNER, K. BASLER "Torsion". Edition Spes, Lausanne, 1971.
- 4) S.KUMINSKI "Structures en poutres caissons reliées par des dalles". Ass. Internation. Ponts charp., Mem, Suisse, (1975), 35, n°, 115-148.