

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité: Genie Civil.

Option: Structures.

Présenté par :

TURKI BAKHTA

ZEMAM ESMA

Sujet du mémoire:

**Analyse des poutres en acier maintenues
latéralement aux extrémités.**

Soutenu publiquement le 03/06/2023 devant le jury composé de:

Mr. T. BENSATTALAH	MCA	Président
Mr. A. SAOULA	MCA	Rapporteur
Mr. T. HASSAINE DAOUADJI	Pr	Examineur
Mr. M. ZIDOUR	Pr	Examineur

Promotion: 2022-2023.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ...

Dans cet espace je souhaiterai dédier ce travail à mes très chers parents

En premier lieu mes dédicaces vont droit à ma chère mère.

Tes encouragements et tes prières.

Ont été d'un grands soutien pour moi je te remercie infiniment.

Je remercie également mon cher père pour sa présence dans ma vie,

de son soutien et tous ses sacrifices et ses précieux conseils,

*J'espère avoir réussi à te rendre fière chose que je tâcherai de continuer
à faire.*

*A mes chers frères HOUCIN et MOKHTAR pour leurs conseils et leur
soutien.*

*A mes belles sœurs MADANIA, FATIMA, SAKINA,
NOUREL HOUDA, SABRINA*

A ma nièce NADA .

*A mes amis, merci à tous mes amis avec qui ont partagé des moments de
ma vie au fil du temps.*

*A mon binôme TURKI BAKHTA Merci pour tous les moments que
nous avons passés ensemble dans ce travail .*

*A ma promotion de Master 2 Génie civil « 2022/2023 » Et Tous ceux que
je connais de près ou de loin, merci à tous, sans exception.*

ZEMAM ESMA

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ...

*Dans cet espace je souhaiterai dédier ce travail à ma chère grand –mère
BAKHIA.*

À mon cher grand-père BOUAZZA.

*En premier lieu mes dédicaces vont droit à ma chère mère. Tes encouragements
et tes prières ont été d'un grands soutien pour moi je te remercie infiniment.*

*Je remercie □ également mon cher père pour sa présence dans ma vie, de son
soutien et tous ses sacrifices et ses précieux conseils.*

*À mes chers frères ABDELHALIM; SIDAHMED TAHA
YACINE; MOHAMED BENAMEUR et mon beau-frère FOUZI et mon
neveu ABDULLAH.*

À mes chères sœurs SANAA; KHAOULA

À mes âmes sœurs MALIKA et DJAOUIDA

À mon cher oncle BENDAOUD ; À mes chers oncles et mes chères tantes.

*Aux précieuses FERIEL; KHOULOUD; NAIMA qui ont partagé la joie et
les ulcères avec moi.*

À mon binôme et chère amie ZEMAM ESMA.

À ma écrivaine préférée et chère copine SAADOUN AMIRA WISSEM.

*À mes chères amis RANIA; DJAMILA; FATIMA; merci pour tous les
moments que nous avons passés ensemble.*

À ma promotion de Master 2 Génie civil «2022/2023 »

TURKI BAKHIA

Remerciements

*Avant toute chose, nous tenons à remercier "Allah" le tout puissant,
pour nous avoir donné la force et la patience.*

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos remerciements : À notre encadreur de mémoire Ms. SAOULA.A enseignant à l'université Ibn Khaldoun De Tiaret , pour avoir accepté de nous encadrer, pour son enseignement, son support, ses encouragements, sa patience qu'il n'a cessé de nous apporter tout au long de ce travail. Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance. Cette page n'aurait probablement pas pu s'écrire sans l'appui moral des membres de nos familles. Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements chaleureux vont également au nos camarades de la promotion « 2022-2023 » de Génie civil "structure" et nos amis pour leur compagnie, leur aide, leur humour, et leur soutien moral aux moments où tout allait mal.

Enfin, Nous réservons une mention particulière à toutes les personnes qui nous ont apporté le soutien et l'aide attendu.

Résumé:

La présente étude montre les résultats d'investigations théoriques sur le déversement par torsion latérale (LTB) de poutres en I bi-symétriques retenues élastiquement contre le gauchissement et contre la rotation dans le plan de déversement par torsion latérale (c'est-à-dire contre la rotation latérale) aux nœuds de support. À cette fin, un modèle analytique a été proposé pour fournir les moments critiques de déversement latéral.

Le modèle proposé est basé sur le principe de l'énergie potentielle totale réalisée dans le contexte de comportement élastique linéaire. Des programmes ont été développés pour faire des calculs numériques, les moments critiques déterminés à l'aide de ces programmes ont été comparées avec les valeurs obtenues avec LTBeam logiciel (FEM). Au moyen de ces exemples numériques, une très bonne congruence des résultats a été trouvée.

Calculs détaillés ont été réalisées pour différentes valeurs de l'indice de fixité contre le gauchissement et contre la rotation dans le plan de flambement latéral par torsion.

Mots clés : Moment critique, Maintiens latéraux, Instabilité, Déversement, La méthode énergétique.

Abstract:

The present study shows the results of theoretical investigations on lateral torsional buckling (LTB) of bi-symmetrical I-beams elastically restrained against warping and against rotation in the lateral torsional buckling plane (i.e. say against lateral rotation) to support nodes. To this end, an analytical model has been proposed to provide the critical lateral buckling moments.

The proposed model is based on the principle of total potential energy realized in the context of linear elastic behavior. Programs were developed to make numerical calculations, the critical moments determined using these programs were compared with the values obtained with LTBeam software (FEM). By means of these numerical examples, a very good congruence of the results was found.

Detailed calculations have been performed for different values of the fixity index against warping and against rotation in the plane of lateral torsional buckling.

Keywords: Critical moment, Lateral restraints, Instability, Lateral Buckling, The energy method.

ملخص:

تُظهر الدراسة الحالية نتائج التحقيقات النظرية حول الانحناء الالتوائي الجانبي (LTB) لحزم I ثنائية المتناظرة مقيدة بشكل مرن ضد الالتواء وضد الدوران في مستوى الالتواء الجانبي (أي ضد الدوران الجانبي) لدعم العقد. تحقيقاً لهذه الغاية ، تم اقتراح نموذج تحليلي لتوفير تقييم الالتواء الجانبي الحرجة.

يعتمد النموذج المقترح على مبدأ إجمالي الطاقة الكامنة المحققة في سياق السلوك المرن الخطي. تم تطوير البرامج لإجراء حسابات رقمية ، وتمت مقارنة التقييم الحرجة التي تم تحديدها باستخدام هذه البرامج مع القيم التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج (FEM)LTBeam. من خلال هذه الأمثلة العددية ، تم الحصول على تطابق جيد للغاية بين النتائج.

تم إجراء حسابات مفصلة لتقييم مختلفة لمؤشر الثبات ضد الالتواء وضد الدوران في مستوى الالتواء الجانبي.

الكلمات المفتاحية: العزم الحرج ، القيود الجانبية ، عدم الاستقرار ، الانحناء ، طريقة الطاقة.

SOMMAIRE

Remerciements	i
Dédicace	iii
Résumés	iv
Sommaire	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Notations	xii
Introduction Générale.....	2

CHAPITRE – I–

Les phénomènes de l'instabilité des structures.

I.1.Introduction	05
I.2. Notion de la stabilité	06
I.3. Les phénomènes d'instabilités	06
I.3.1.Le flambement	06
I.3.1.1 Aspect théorique de flambement	07
I.3.1.1.1 Le flambement des poteaux par flexion	07
I.3.1.1.2.Flambement des poteaux par torsion	07
I.3.1.1.3. Flambement des poteaux par flexion –torsion	08
I.3.1.2.Aspect expérimental du flambement	08
I.3.2. Déversement	09
I.3.2.1.Aspect théorique du déversement:	09
I.3.2.1.1. Poutre en section U	09
I.3.2.1.2. Poutre en section I.....	10
I.3.2.1.3. Section rectangulaire	10
I.3.2.1.4. Paramètre influençant le déversement	11
I.3.2.1.5. Les dangers du déversement	12
I.3.3..Le voilement	12
I.3.3.1. Aspect expérimental du voilement :	13
I.3.3.2. Aspect théorique du voilement :	14
I.4.Conclusion :	15

CHAPITRE – II–

Aspect analytique et réglementaire du déversement

II.1.Introduction :	17
II.2. Origine de phénomène :	18
II.3. Poutres maintenus latéralement :	18
II.4. Etude de déversement :	20
II.4.1. Principe du déversement :	20
II.4.2. Théorie linéaire de déversement élastique :	21
II.4.3. Aspect réglementaire du déversement:	22
II.4.3.1. Déversement d'une poutre simple en flexion pure:	22
II.4.3.2. Evaluation du moment critique de déversement (Méthode approximative):	24
II.4.3.3. Le moment critique de déversement selon L'Eurocode 3 :	26
II.4.3.4. Calcul simplifié du moment critique de déversement élastique (SIA 161):	26
II.5.Conclusion :	30

CHAPITRE – III–

Elaboration d'un modèle analytique.

III.1. Introduction :	32
III.2. Maintenu élastique contre le gauchissement et contre la rotation latérale	32
III.3. Etude de déversement latéral (LTB) des poutres :	35
III.3.1. Energie potentielle totale:	35
III.3.2. Les solutions numériques de déversement latéral:	37
III.4. Conclusion :	40

CHAPITRE –IV–

Résultats et discussions.

IV.1. Introduction:	42
IV.2. Validations numériques :	43
IV.3. Résultats et applications :	46
IV.3.1. Effet des indices de fixité sur le moment critique de déversement:	46
IV.3.2. Effet de la longueur de la poutre sur le moment critique de déversement:	51
IV.3.3. Effet de la hauteur de charge sur le moment critique de déversement:	55

IV.4.Conclusion:	58
Conclusion Générale et perspectives	59
Références bibliographiques	63

Liste des figures

Figure I.1 : Phénomène de flambement.	05
Figure I.2 : Phénomène de déversement.	05
Figure I.3 : Phénomène de voilement.	06
Figure I.4 : flambement des poteaux par flexion	07
Figure I.5 : flambement des poteaux par torsion.....	07
Figure I.6 : flambement des poteaux par flexion-torsion	08
Figure I.7 : Poutre en section U	10
Figure I. 8 : Poutre en section I.....	10
Figure I. 9 Poutre en section rectangulaire.....	11
Figure I.10 : Les niveaux d'application des charges.	12
Figure I.11 : Une plaque rectangulaire.....	13
Figure II.1 : Déversement des poutres	17
Figure II.2 : Exemples de maintien latéral des sections élancées.	19
Figure II.3 : Phénomène du déversement.....	21
Figure II.4 : Comportement d'un élément fléchi.	21
Figure II.5 : Translation et rotation d'une section d'un élément de poutre	22
Figure II.6 : Déversement d'une poutre constituée d'une section en I bi-symétrique.	23
Figure II.7 : Conditions d'appui, charges et types de sections transversales.	25
Figure II.8 : Mode de résistance à la torsion de quelques sections.	29
Figure III.1 : Diagramme statique de la poutre.	33
Figure III.2 : Une poutre simplement appuyée, avec une charge uniformément répartie	36
Figure IV.1 : Exemple de poutre modélisée à l'aide du logiciel <i>LTBeam</i>	42
Figure IV.2 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_o , pour l'indice de fixité sélectionné κ_v pour une poutre avec charge concentrée à mi-portée.....	47
Figure IV.3 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_o , pour l'indice de fixité sélectionné κ_v pour une poutre avec une charge uniformément répartie.....	47

Figure IV.4 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour l'indice de fixité sélectionné κ_ν pour une poutre avec des moments aux extrémités ($\psi = 1$). 48

Figure IV.5 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_u , pour l'indice de fixité sélectionné κ_ω pour une poutre avec charge à mi-portée..... 49

Figure IV.6 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_u , pour l'indice de fixité sélectionné κ_ω pour une poutre avec une charge uniformément répartie..... 49

Figure IV.7 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_u , pour l'indice de fixité sélectionné κ_ω pour une poutre avec des moments aux extrémités ($\psi = 1$). 50

Figure IV.8 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes longueurs L d'une poutre sous charge concentrée à mi-portée 51

Figure IV.9 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes longueurs L d'une poutre sous charge uniformément répartie..... 52

Figure IV.10 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes longueurs L d'une poutre soumise à des moments aux extrémités ($\psi = 1$).. 52

Figure IV.11 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ν , pour différentes longueurs L d'une poutre sous charge concentrée à mi-portée. 53

Figure IV.12 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ν , pour différentes longueurs L d'une poutre sous charge uniformément répartie..... 54

Figure IV.13 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ν , pour différentes longueurs L d'une poutre soumise à des moments aux extrémités ($\psi = 1$). 54

Figure IV.14 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes positions e_z d'une poutre sous charge concentrée à mi-portée..... 55

Figure IV.15 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes positions e_z d'une poutre sous charge uniformément répartie..... 56

Figure IV.16 : Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ν , pour différentes positions e_z d'une poutre sous charge concentrée à mi-portée..... 57

Figure IV.17 Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ν , pour différentes positions e_z d'une poutre sous charge uniformément répartie 57

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Valeurs des facteurs C_1 , C_2 et C_3 pour $k\phi = 1.0$ 26

Tableau III.1 : Fonctions Polynômiales P_{U_i} utilisées 38

Tableau IV.1: Comparaison de M_{cr} pour poutre IPE300 ($L = 5\text{m}$) sous charge concentrée appliquée à mi-portée de la poutre. 44

Tableau IV.2: Comparaison de M_{cr} pour poutre IPE300 ($L = 5\text{m}$) sous charge répartie. 45

Tableau IV.3: Comparaison de M_{cr} pour poutre IPE300 ($L = 5\text{m}$) sous des moments aux extrémités 46

Notations

N : L'effort normal, en générale.

M_0 : Moment fléchissant.

σ_e : Contrainte limite élastique.

σ_K : Contrainte critique d'Euler.

λ : Paramètre d'élançement.

σ_s : Contrainte d'affaissement.

N_c : L'effort de compression.

E : Module d'élasticité.

α : Facteur d'imperfection.

$\bar{\lambda}$: L'élançement réduit.

χ : Coefficient de réduction.

l_k : Longueur de flambement.

l_0 : Longueur nominale.

η_1, η_2 : Les facteurs de distribution de rigidité.

F : Charge concentrée verticale.

G : Centre de gravité.

M_f : Moment de flexion maximal pondérée.

d : étant la hauteur d'âme entre semelles.

a : étant l'écartement, entre nus intérieurs, des raidisseurs.

N_I : Charge axiale de compression.

N_{cr} : Charge critique de flambement élastique.

I_y : Moment d'inertie par rapport à l'axe y .

I_z : Moment d'inertie par rapport à l'axe z .

EI : Rigidité constante.

σ_{cr} : Contrainte critique de flambement élastique.

f_y : Limite d'élasticité.

φ : Angle de torsion.

G : Module de cisaillement.

K : Constante de torsion uniforme.

I_w : Constante de gauchissement.

$C1, C2$ et $C3$: Facteurs dépendant du type de chargement et des conditions d'appui.

k_v, k_φ : Coefficients d'encastrement aux appuis.

z_a : Distance entre le centre de cisaillement C et le point d'application de la charge.

z_C : Distance entre le centre de gravité G et le centre de cisaillement C.

l_D : Longueur de déversement (distance entre deux appuis latéraux).

C : Centre de cisaillement.

β : Caractéristique sectorielle de la section.

v : Déplacement latéral du centre de cisaillement.

M_{crD} : Moment critique de déversement élastique.

M_{pl} : Moment de flexion plastique ;

M_D : Résistance ultime au déversement.

σ_{Dv} : la composante de la torsion uniforme.

σ_{Dw} : la composante de la torsion non-uniforme.

M_{cd} : L'efforts de flexion et cisaillement.

V_{cd} : L'efforts de cisaillement.

$V_{o,Rd}$: Résistance de la section perforée à la flexion.

$M_{o,Rd}$: Résistance de la section perforée à l'effort tranchant.

v : Déplacement lateral.

w : Déplacement vertical.

θ : Angle de torsion.

U_L : Energie potentielle totale.

W : Le travail extérieur.

Introduction générale

1. Introduction :

En raison de la haute résistance de l'acier, les poutres de ce matériau utilisé dans les structures se caractérisent par petites épaisseurs des parois de la section. Par conséquent, ils sont susceptibles de diverses formes de perte de stabilité. L'une des formes de base de la perte de stabilité générale des poutres en flexion est le déversement par torsion latérale (LTB). Par conséquent, dans la conception des poutres en acier, le déversement latéral par torsion doit être pris en compte, car cela peut réduire considérablement la capacité portante et affecter la sécurité de l'ensemble de la structure.

Dans de tels cas, les sections en I bi-symétriques sont les plus couramment utilisées. Cela se produit parce que, par rapport à d'autres profils de hauteurs, les sections en I présentent une rigidité en torsion de gauchissement importante, ce qui augmente la résistance de la poutre au déversement latéral en torsion.

Dans les structures métalliques, les poutres à une travée sont les plus usuelles, ce qui est lié, à la facilité de leur assemblage. Dans de nombreux cas techniquement importants, on trouve des schémas statiques de poutres, dans lesquels les poutres sont supporté librement en flexion par rapport à l'axe le plus fort de la section. De plus, ils sont élastiquement retenu contre le gauchissement et la rotation par rapport à l'axe le plus faible de la section. En conséquence, le modèle de calcul largement utilisé pour de tels modèles jusqu'à présent (c'est-à-dire support de la fourche théorique) conduit à une simplification importante.

En revanche, le modèle proposé dans ce travail, qui prend en compte la fixation élastique de la poutre aux nœuds d'appui, permet une représentation beaucoup plus précise de conditions aux limites réelles. Cela produit une valeur plus précise du moment critique de la poutre par torsion latérale et conception plus optimale de tels éléments.

Dans cette étude, nous sommes intéressés au déversement latéral par torsion des poutres à une seule travée avec des sections en I bi-symétriques. Ils sont élastiquement retenus contre le gauchissement et contre la rotation dans le plan de flambement par torsion latérale (c'est-à-dire contre la rotation latérale) aux nœuds de support. En flexion par rapport au grand axe de raideur de la section, on trouve des conditions d'appui simples au les soutiens. Dans l'analyse du déversement par torsion latérale, la méthode énergétique a été utilisée. Des programmes de calculs numériques ont été développées pour estimer le moment critique élastique pour des diagrammes de chargement les plus fréquemment rencontrés. Des calculs détaillés ont été

faites pour des poutres avec des valeurs différentes de l'indice de fixité (contre le gauchissement κ_ω et contre rotation κ_v avec l'hypothèse de la symétrie des conditions aux limites par rapport à la poutre mi-portée.

2. L'objectif du mémoire:

L'objectif de ce travail de recherche peut être résumé au développement d'un modèle analytique qui tient en compte l'impact de raidisseurs (maintiens latéraux) qui se trouvent aux niveau des appuis de poutre contre le gauchissement, sur la valeur du moment critique. Les résultats de ce modèle a été comparés avec ceux des modèles par éléments finis (*LTBeam*) afin de valider et d'évaluer la performance du modèle proposé.

Après à une introduction générale, le but de premier chapitre est d'étudier en premier lieu ces points particulièrement critiques (Les phénomènes d'instabilité), avant d'aborder les calculs généraux classiques des structures.

Le deuxième chapitre sera consacré à une revue générale sur l'instabilité des éléments à parois minces (déversement), analysés de différents points, théorique et règlementaire.

Le troisième chapitre est réservé au développement du modèle analytique pour l'étude d'instabilité des poutres qui tient en compte les maintiens latéraux qui se trouvent aux des appuis.

Le dernier chapitre expose la modélisation en utilisant le logiciel « *LTBeam* », ainsi que la comparaison des résultats éléments finis et le modèle analytique. Lors de la vérification des calculs, des valeurs prédéterminées des indices de la fixité k_ω et k_v ont été supposées

Enfin, on achève ce travail par une conclusion générale portant sur les différents aspects traités dans ce mémoire.

Chapitre – I–

Les phénomènes de l'instabilité des structures.

I.1. Introduction :

La théorie de la stabilité a été développée pour déterminer les conditions dans lesquelles une structure en équilibre n'est plus stable. Il faut s'assurer que la structure s'écarte légèrement de sa position d'équilibre en raison des forces, chocs, vibrations, imperfections, contraintes résiduelles, etc. Une fois la perturbation supprimée, aura tendance à revenir à sa position initiale, nous avons trois instabilités:

- Le flambement : qui affecte les barres comprimé (flambement simple) ou comprimés et fléchis (flambement par flexion). [1]

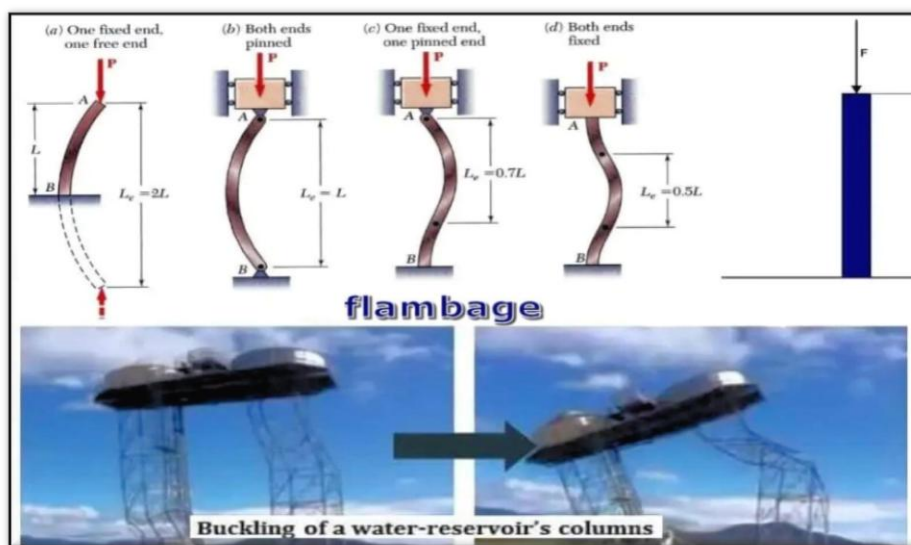


Figure I.1 : Phénomène de flambement

- Le déversement : qui affecte les semelles comprimées des pièces fléchies.[1]

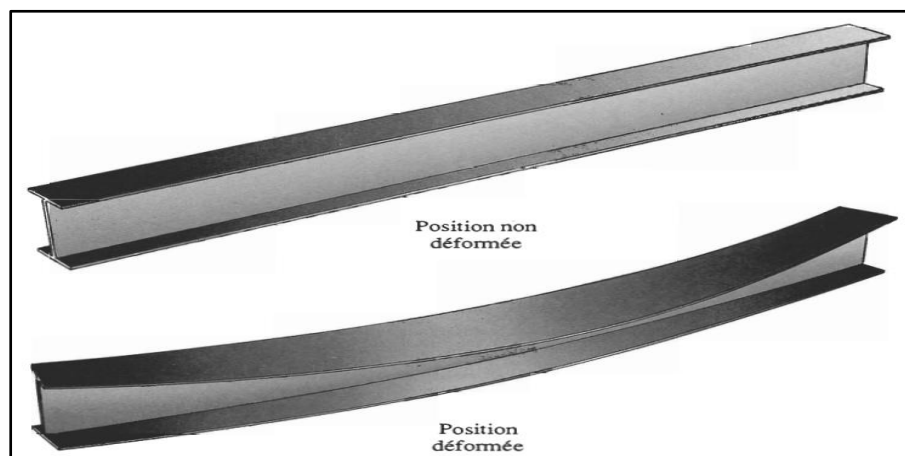


Figure I.2 : Phénomène de déversement

- Le voilement : qui affecte les âmes des pièces fléchies. [1]

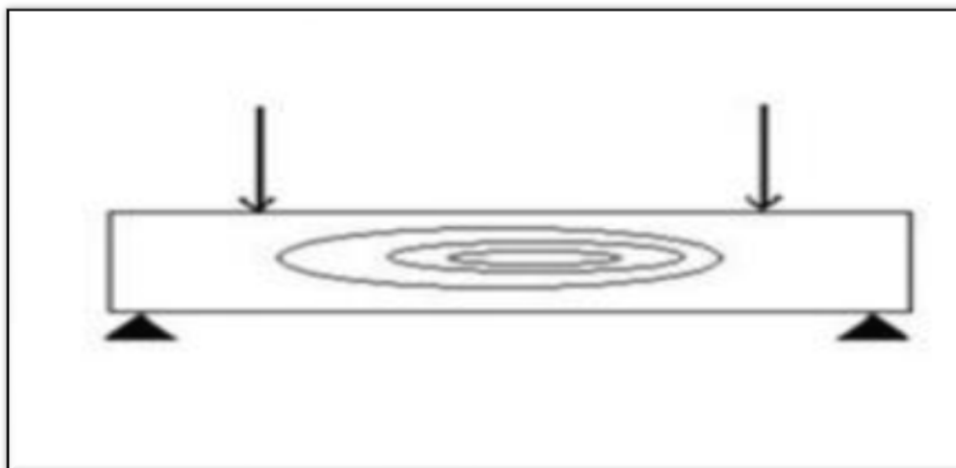


Figure I.3 : Phénomène de voilement

Ces phénomènes d'instabilité élastique sont très importants dans l'étude des structures en acier.

I.2. Notion de la stabilité :

On peut dire que la stabilité est une capacité d'un système physique à revenir à l'équilibre lorsqu'il est perturbé légèrement. Pour un système mécanique, on peut adopter la définition donnée par DIRICHLET: «L'équilibre d'un système mécanique est stable si, lorsque l'on déplace les points du système de leur position d'équilibre d'une quantité infinitésimale et en leur donnant à chacun d'eux une faible vitesse initiale, les déplacements des différents points du système restent, pendant le déplacement, contenus dans des limites imposées faibles ». Pour un corps élastique, tout comme pour un corps rigide, on peut parler de stabilité ou d'instabilité des positions d'équilibre . Si une fois l'action extérieure disparaît, le système retournant à sa position initiale, on dit que cette position est stable. Si le système n'y retourne pas, elle est instable. [2]

I.3 Les phénomènes d'instabilités :

I.3.1 Le flambement :

Le flambage est un phénomène physique relevant des principes de la résistance des matériaux. Lorsqu'une structure est comprimée dans le sens de la longueur, elle a tendance à fléchir perpendiculairement à l'axe de la force appliquée, en raison d'un phénomène d'instabilité élastique. [3]

I.3.1.1 Aspect théorique de flambement :

Il existe différentes manières ou modes de rupture par flambage. Pour un élément de structure, il est souvent nécessaire d'en vérifier plusieurs et de s'assurer que les charges sont éloignées des charges critiques associées à chaque mode ou mode de flambement. Les modèles typiques sont :

I.3.1.1.1 Flambement des poteaux par flexion :

Mode de flambement dans lequel un élément comprimé est fléchi latéralement sans tourner ni changer sa section transversale.

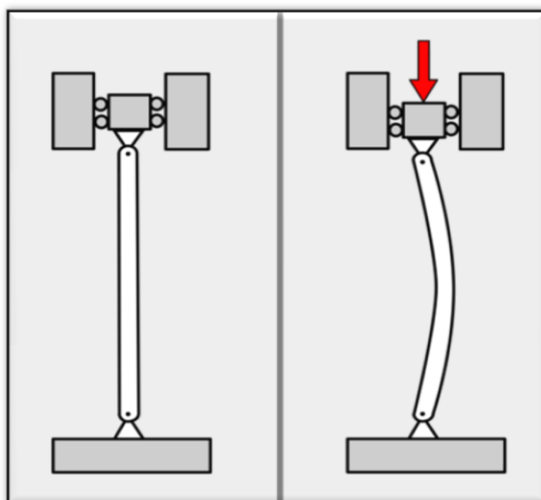


Figure I.4 : Flambement des poteaux par flexion

I.3.1.1.2 Flambement des poteaux par torsion :

Mode de flambement dans lequel un élément de compression tourne autour de son centre de coupe.

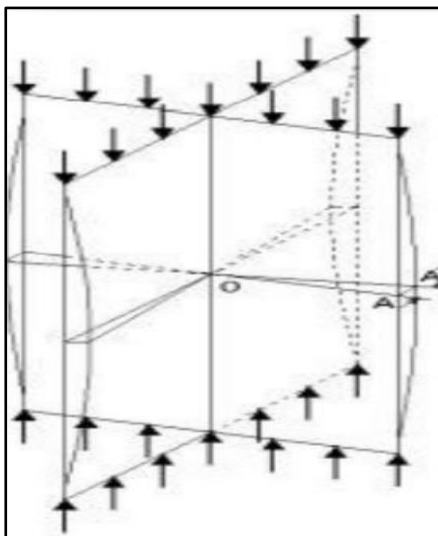


Figure I.5 : Flambement des poteaux par torsion

I.3.1.1.3 Flambement des poteaux par flexion –torsion :

Mode de flambement dans lequel un élément comprimé est simultanément fléchi et tourné sans modification de sa section transversale.

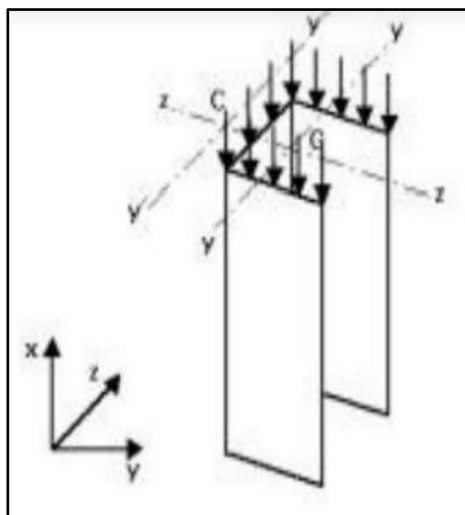


Figure I.6 : Flambement des poteaux par flexion-torsion

I.3.1.2 Aspect expérimentale de flambement :

L'expérimentation en laboratoire, effectuée sur des poutrelles laminées courantes, soumises à des efforts de compression progressivement croissants, montre que la ruine des pièces se manifeste de deux façons différentes, selon l'élanement des pièces.

- Pour les pièces de faible élanement (forte section, faible hauteur, $\lambda < 20$), la ruine se manifeste par l'affaissement des membrures, sous la contrainte approximativement.

- Pour les pièces de grand élanement ($\lambda > 100$), la ruine intervient pour une contrainte d'affaissement (inférieure à la limite élastique σ_e et à la contrainte d'Euler), pour laquelle on observe une augmentation brutale des déformations, avec l'apparition de zones plastifiées, suivie d'un effondrement. En outre, la courbe contrainte en fonction de déformation n'est pas linéaire.

L'affaissement a lieu pour une contrainte inférieure à la contrainte d'Euler représentée en fait une borne supérieure, que l'on ne peut atteindre, du fait que la théorie d'Euler prend en compte une barre idéale, parfaitement rectiligne et soumise à un effort de compression N

parfaitement centré au centre de gravité de la section et appliqué suivant l'axe moyen, ce qui n'est jamais le cas dans la réalité. En effet :

- 1 - Les pièces, après leur traitement en laminoir et leurs diverses manutentions et transport, ne sont pas rigoureusement rectilignes (défauts de rectitude) ;
- 2 - Leurs inerties ne sont pas constantes (tolérances de laminage) ;
- 3 - Les efforts normaux de compression et les appuis ne sont jamais rigoureusement centrés (défauts de centrage) ;
- 4 - Les poteaux, sur chantier, ne sont jamais parfaitement verticaux (tolérances de montage) ;
- 5 - Enfin, le module d'élasticité E de l'acier n'est pas vraiment constant, du fait des contraintes résiduelles de laminage (défauts d'homogénéité). Ces cinq types de défauts, plus ou moins prononcés, mais réels et inévitables, contribuent à affaiblir les éléments [4]

I.3.2 Le déversement :

Le déversement est lié à la flexion, il s'agit d'un flambement de l'aile comprimée et présente des analogies certaines avec les phénomènes de flambement. La poutre, pour un moment critique entre en flexion et en torsion dans son plan de plus faible inertie. Ce phénomène se produit en général pour des poutres ayant une faible inertie à la flexion transversale et à la torsion.

I.3.2.1 Aspect théorique de déversement :

I.3.2.1.1 Poutre en section U :

Les sections en U sont largement utilisées comme poutres dans la pratique. Cependant, la méthode de calcul donnée par l'Eurocode 3 n'est pas applicable dans le cas où la poutre est chargée excentriquement (sur le plan de l'âme). On envisage de proposer une méthode de calcul pour le déversement. Cette méthode est appelée méthode de calcul ajustée pour le déversement des poutres en U chargées excentriquement. Les résultats de calcul théorique seront ensuite comparés aux résultats obtenus par la méthode des éléments finis pour validation.



Figure I.7 : Poutre en section U

I.3.2.1.2 Poutre en section I :

Une poutre à section en I, fléchie par rapport à son axe de forte inertie, peut présenter un risque de déversement si sa semelle comprimée n'est pas maintenue de façon continue sur sa longueur.

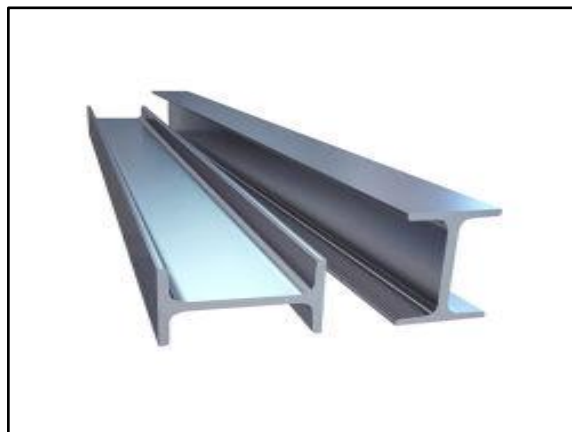


Figure I.8 : Poutre en section I

I.3.2.1.3 : Section rectangulaire (poutre sans ailes) :

Nous avons vu, expérimentalement, que l'application d'un moment de flexion simple vertical M_0 se transformait en une superposition d'un moment de flexion déviée et d'un moment de torsion. Autrement dit, le moment M_0 se projette :

- Sur l'axe des y en flexion transversale,
- Sur l'axe des z en flexion verticale,
- Sur l'axe des x en torsion

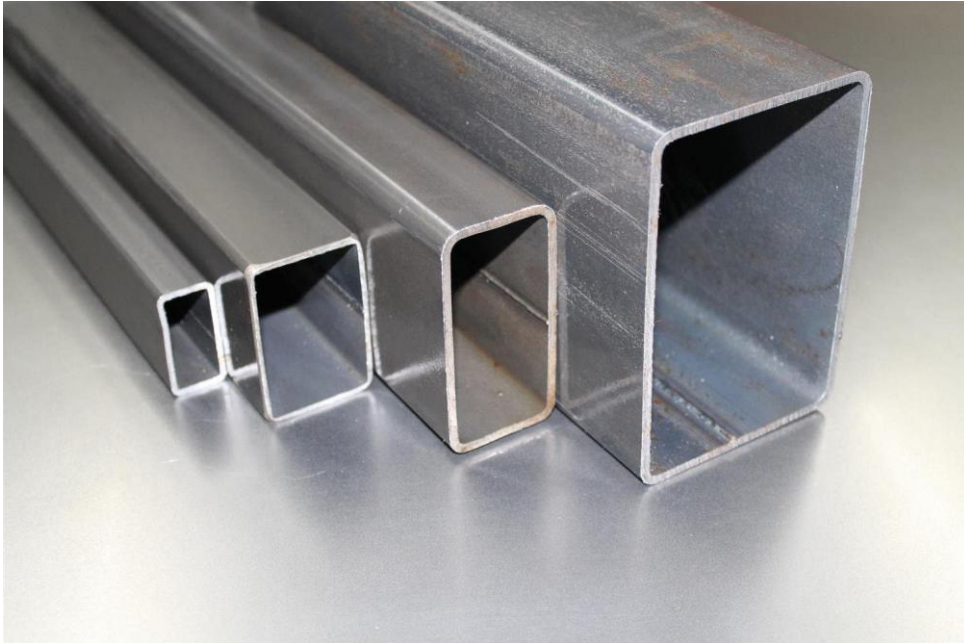


Figure I.9 : Poutre en section rectangulaire.

I.3.2.1.4 Paramètre influençant le déversement:

- **Forme de la section:**
 - Augmenter le moment d'inertie en flexion transversale et/ou le moment d'inertie de gauchissement
 - Choisir ou créer une section fermée (grande raideur en torsion)
- **Conditions d'appui et de retenue:**
- **Créer des éléments d'entretoisement pour stabiliser la poutre (bracon).**
- **Les éléments fixés ponctuellement sur la semelle comprimée réduisent le risque de déversement:**
 - Solives sur poutre principale
 - Pannes sur traverse de portique
- **Les éléments fixés en continu sur la semelle comprimée réduisent le risque de déversement (e.g. dalle béton fixée sur une poutre de plancher par des goujons). A noter que les éléments doivent être fixés et non simplement posés pour constituer des appuis efficaces. Dans le doute on ne doit pas les prendre en compte.**
- **Distribution des moments de flexion, faisant varier les lieux des semelles comprimées**

- Niveau d'application des charges:

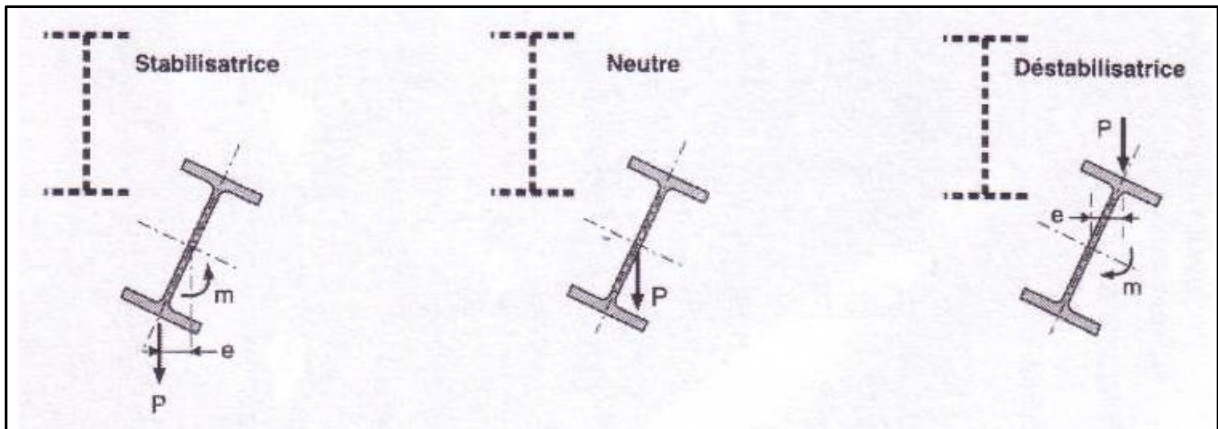


Figure I.10 : Les niveaux d'application des charges

I.3.2.1.5 Les dangers du déversement:

Dans la pratique, les entreprises et bureaux d'études sont très avertis des dangers du flambement, et chaque pièce comprimée est calculée en conséquence. En revanche concernant les pièces fléchies, les calculs très souvent se limitent simple dimensionnement en flexion (simple ou déviée), sans vérification du risque de déversement .En fait, les désordres provoqués par le déversement peuvent être légers (poutre déformées bacs acier déchirés), mais également graves (effondrements partiels ou totaux). [6]

I.3.3.Le voilement :

Le voilement est un phénomène peut également apparaitre sous un effort de cisaillement simple, il est dans ce cas attaché à la diagonale comprimée. les âmes des poutres utilisées en construction métallique sont généralement mince et donc susceptibles de se voiler sous des efforts de compression ou de cisaillement excessif. Il se produit lorsqu'un élément plan comprimé se dérobe sous l'effet d'un chargement de compression, qui peut être due à un effort normal ou à une contrainte normale dans une partie de la section. C'est un phénomène d'instabilité locale. Le voilement affecte les plaques minces sous l'action des contraintes de compression et des contraintes de cisaillement. Ce phénomène peut se produire tant dans le domaine élastique qu'élasto-plastique, il engendre des déformations très importantes des parois.[7]

I.3.3.1 Aspect expérimental du voilement :

Si l'on soumet une plaque rectangulaire à une compression uniforme sur deux côtés opposés, parallèlement à son plan moyen, on observe que la plaque, au-delà d'une certaine charge, se déforme transversalement. Il s'agit du phénomène de voilement, qui se manifeste par des ondulations, qui ne sont pas sans rappeler le phénomène de flambement pour des pièces à une dimension, à la différence près que le voilement se développe plus progressivement, les grandes déformations n'apparaissant pas brutalement et ne conduisant généralement pas à la ruine de la pièce. Le phénomène de voilement peut également apparaître sous un effort de cisaillement simple. Il est, dans ce cas, attaché à la diagonale comprimée.

Les âmes des poutres utilisées en construction métallique sont généralement minces et donc susceptibles de se voiler sous des efforts de compression ou de cisaillement excessifs. Les essais montrent que les déformations des âmes de poutres par voilement retraduisent non pas par des ondulations régulières (comme pour une plaque mince libre), mais par des cloques et des boursouflures (zones d'acier plastifiées), localisées dans les zones sur comprimées, comme le montre la figure I.11.[4]

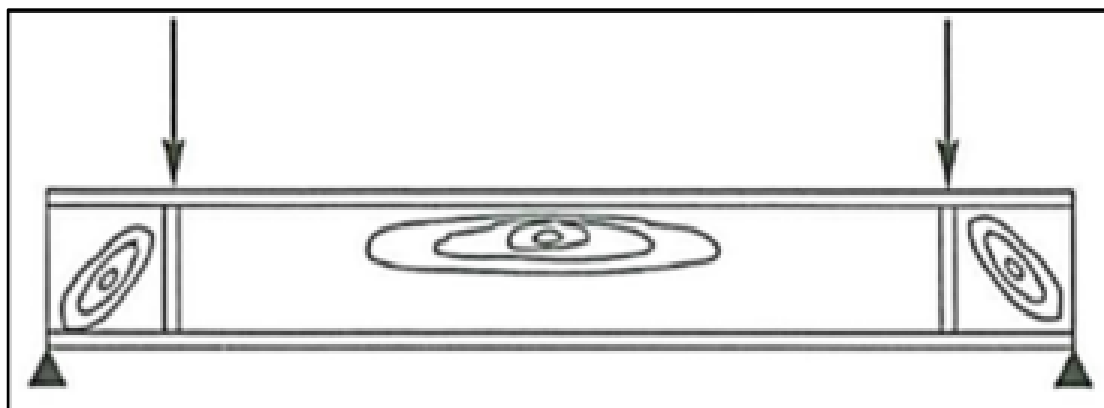


Figure I.11 : Une plaque rectangulaire

Les essais montrent également que les âmes, bien que voilées, résistent encore à des efforts additionnels. Autrement dit, le voilement ne conduit pas à une ruine rapide et brutale des pièces, ce qui en fait un phénomène finalement peu dangereux. Pour éviter le voilement des âmes des poutres, deux moyens sont possibles :

- Soit augmenter l'épaisseur de l'âme,

- Soit disposer des raidisseurs d'âme, judicieusement positionnés. Le choix est dicté, cas par cas, par une comparaison des coûts.[4]

I.3.3.1 Aspect théorique du voilement :

La théorie du voilement consiste généralement à utiliser la méthode énergétique de Timoshenko , qui détermine une contrainte critique, obtenue dès lors que le travail des forces extérieures appliquées atteint le niveau de potentiel interne de la plaque sollicitée. L'expérience montre cependant que cette théorie est insuffisante, car les contraintes critiques calculées ne correspondent que rarement aux contraintes de ruine expérimentales. Cela s'explique, entre autres, par les effets de membrane, à savoir des tractions stabilisatrices générées par les déformations transversales, que la théorie ne prend pas en compte. Nous ne développerons donc pas ici les calculs théoriques du voilement: – D'une part, en raison de leur longueur et de leur grande complexité, – D'autre part, parce que les profilés laminés normalisés (IPE, HEA...) sont peu ou pas sensibles au voilement ; leurs âmes étant sur dimensionnées. En revanche, les âmes des profilés reconstitués soudés sont très sensibles au voilement. Il s'agit des poutres ou caissons d'ouvrages d'art, des parois de réservoirs, de silos....[4]

I.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons procédé à la présentation des phénomènes d'instabilité métallique et plus précisément le voilement, le flambement et le déversement des poutres métalliques et ces aspects théoriques et expérimentaux.

Cette revue ne donne aucune information sur le calcul ou l'aspect réglementaire de la stabilité des poutres métalliques. En conséquence, il est très intéressant de consacrer un chapitre pour présenter une méthode permettant de déterminer les charges maximales qu'une structure peut supporter sans perte d'équilibre.

Chapitre –II–

Aspect Analytique et réglementaire du déversement.

II.1. Introduction :

En résistance des matériaux, le déversement est un phénomène d'instabilité affectant une poutre subissant un moment de flexion.

Lorsqu'une poutre est fléchie, l'une de ses faces est tendue et l'autre est comprimée. Lorsque cet effort de compression atteint une valeur critique dépendant notamment des conditions d'appui et de la distribution du moment de flexion, le côté comprimé va voiler, à la manière d'une colonne comprimée qui flambe. Ce phénomène est appelé déversement et, en fonction des rigidités torsionnelles et flexionnelles des différentes parties de la section, il s'accompagne d'une rotation (torsion) de la section droite de la poutre, d'où l'expression « flambage latéral torsionnel ». [14]

Le déversement est un phénomène d'instabilité géométrique des poutres soumises à un moment de flexion qui survient lorsque la partie comprimée ou l'aile de certaines sections ouvertes se dérobe latéralement, entraînant la section dans un mouvement de translation horizontale et de rotation autour du centre de cisaillement en plus de la translation verticale due aux charges appliquées.

Ce phénomène concerne principalement les profilés en acier, d'habitude très élancés, au contraire des sections de bois ou de béton armé, généralement plus massives et plus rigides en torsion. Pour cette raison, la majorité des études précises sur le déversement se concentrent sur les sections en acier, en particulier sur les sections simplement ou doublement symétriques en H ou en I, les plus sujettes au déversement.[14]

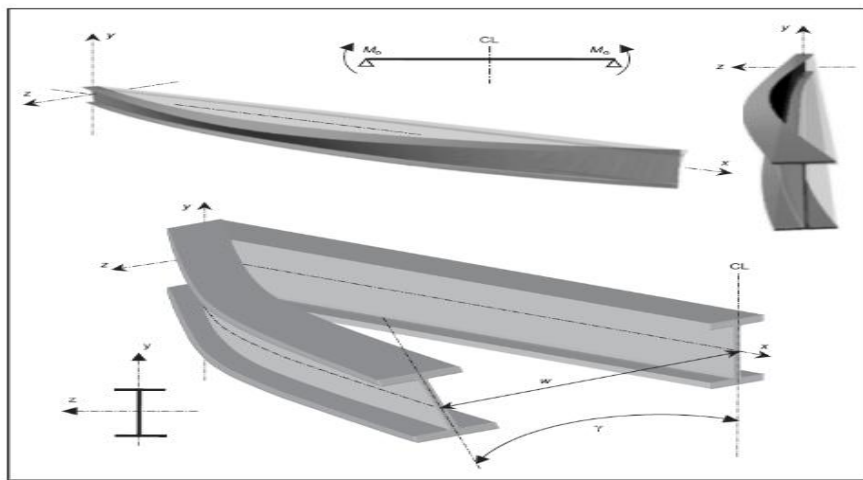


Figure II.1: Déversement des poutres

II.2. Origine de phénomène :

L'origine de ce phénomène est une compression trop importante dans l'une des semelles d'une poutre en flexion. Cette instabilité correspond à un mode propre de déplacement par flexion latérale et par torsion. La rotation de torsion est favorisée par les actions respectivement divergente de la membrure comprimée, et stabilisante de la membrure tendue. Le déversement est lié à la flexion, il s'agit d'un flambement de l'aile comprimée et présente des analogies certaines avec les phénomènes de flambement.[15]

II.3. Poutres maintenues latéralement :

Les poutres en acier peuvent souvent être dimensionnées simplement sur la base de la résistance aux moments fléchissant (en s'assurant que le moment de résistance de calcul de section transversale choisie est supérieur au moment maximum appliqué) et de la rigidité, c'est-à-dire en vérifiant que la poutre ne présente pas une flèche susceptible d'affecter les considérations de bon fonctionnement en service. Les poutres empêchées de se déplacer latéralement sont dites "maintenues latéralement", et ne sont pas affectées par le flambement hors du plan (déversement).

Dans la littérature, on ne relève que très peu de méthode de calcul permettant de prendre en compte la présence des maintiens latéraux ou en rotation dans l'évaluation du moment critique de déversement. Cette configuration est pourtant très fréquemment rencontrée dans la pratique. Les poutres en acier qui sont empêchées de se déplacer latéralement sont dites «maintenues latéralement » et ne sont pas affectées par le phénomène d'instabilité par flexion latérale et torsion appelé « déversement » (flambement latéral de la semelle comprimée hors du plan principal de flexion).

De telles poutres doivent simplement faire l'objet, à l'ELU, d'une vérification de la résistance au(x) moment(s) de flexion et à (aux) l'effort(s) tranchant(s) de leur section transversale. Il est donc particulièrement important d'identifier de telles poutres. Il n'y a pas de risque de déversement est empêché dans le cas où la zone comprimée et maintenue dans le sens latérale.

Les poutres peuvent être considérées comme maintenues latéralement si :

- Un blocage latéral de la semelle comprimée est assuré exemple un plancher en béton ou des tôles nervurés. Ceci est réalisé, par exemple par une véritable fixation d'un

système de plancher sur la semelle supérieure d'une poutre à appuis simples (de nombreux concepteurs considèrent que le frottement généré entre une dalle en béton et la semelle d'une poutre en acier constitue une véritable fixation).

- N.B. Il faut noter qu'un blocage latéral de la semelle tendue est pratiquement inutile et ne permet pas de considérer que la poutre est maintenue latéralement.
- Un blocage continu contre la torsion de la section est réalisé, théoriquement à n'importe quel niveau (mais de préférences contre la semelle comprimée) exemple par des tôles nervurées fixées efficacement sur des profilés de faible hauteur $\leq 200\text{mm}$.

Il existe des éléments ou dispositifs de contreventement latéral de la membrure comprimée ou de maintien de la section contre la torsion, « suffisamment rapprochés » (pannes, poutres transversales). Dans ce cas l'élanement selon l'axe faible de la poutre fléchie sera suffisamment petit.

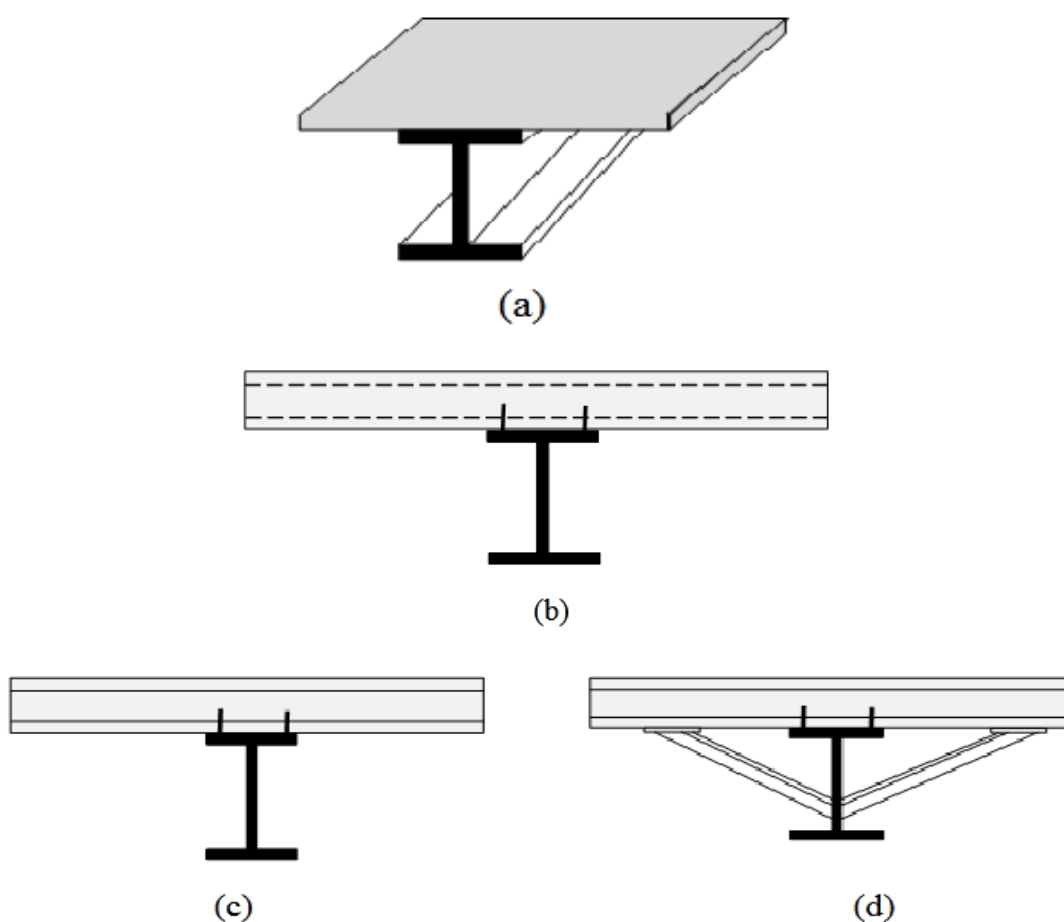


Figure II.2 (a) (b) (c) et (d) : Exemples de maintien latéral des sections élancées

Dans bon nombre de cas, les conditions de maintiens latéraux le long des poutres fléchies sont difficiles à interpréter et il est malaisé pour le concepteur d'évaluer leur réelle efficacité. Par exemple, lorsque :

- une traverse à mi-longueur de plusieurs poutres fléchies parallèles n'est pas, elle-même, reliée à un contreventement qui assure son propre blocage.
- une couverture en tôles n'est pas fixée fermement aux poutres (points de soudure ou clous tirés par exemple) .
- les pièces d'entretoisement sont fixées sur, ou à proximité, de la semelle tendue.
- des pièces de bois posent sur la poutre sans liaison ferme, ...etc.

Par sécurité, toutes ces situations seront considérées comme des cas de poutres non maintenues latéralement à moins que l'on ne puisse estimer (prudemment), pour en tenir compte, la rigidité de ces supports (ressorts élastiques).

Une attention toute particulière sera également accordée aux différentes phases de construction des ouvrages, phases durant lesquelles, tous les supports ne sont pas nécessairement en place. En outre, les profils fléchis selon leur axe faible ne peuvent présenter une ruine par déversement et il est peu probable que les profils offrant des rigidités latérales et de torsion élevées (par exemple les sections creuse rectangulaires) présentent ce mode de ruine.

II.4. Etude de déversement :

II.4.1. Principe du déversement :

Les poutres fléchies sont en général constituées de profilés en I. Comme leur inertie par rapport à l'axe faible z est de beaucoup inférieure à celle relative à l'axe y , cela peut être la cause d'un phénomène d'instabilité appelé déversement. Pour illustrer ce phénomène, prenons Le cas de la poutre en porte-à- faux sollicitée à son extrémité par une charge concentrée verticale (Fig.3). Si pour une faible charge, elle ne se déforme que perpendiculairement à son axe de forte inertie (verticalement, dans ce cas), la partie comprimée du profilé va se dérober latéralement pour échapper à la compression si l'on augmente la charge: la poutre déverse, ce qui fait subir à chaque section – en plus de la déformation verticale – un mouvement de translation horizontal accompagné d'une rotation autour de son centre de cisaillement.[16]



Figure II.3: Phénomène du déversement.

II.4.2. Théorie linéaire de déversement élastique:

D'une façon générale, on peut dire que la résistance ultime d'une poutre fléchie qui déverse est atteinte pour une charge Q_D inférieure à la charge Q_{pl} correspondant à la plastification totale de la section (Fig.4). Une fois que le déversement s'est produit, la poutre montre un comportement instable similaire à celui correspondant au flambement par divergence. [16]

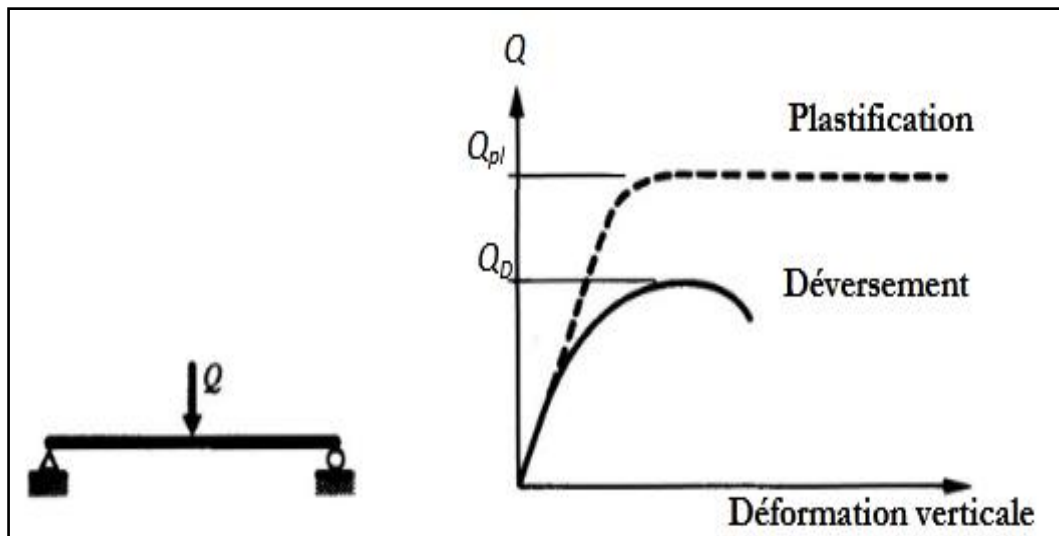


Figure II.4: Comportement d'un élément fléchi.

On pourrait considérer le déversement comme un flambement latéral de la membrure comprimée de la poutre dans le plan horizontal. Cette conception, justifiée au paragraphe est cependant simpliste et conservatrice. En effet, supposons que la moitié comprimée de la poutre montrée à la figure (Fig.4) flambe latéralement et qu'elle subisse de ce fait un déplacement latéral v , on voit que cette partie ne peut flamber seule.

La continuité avec la moitié tendue du profilé exige que les deux parties de la section subissent une rotation d'un même angle φ .

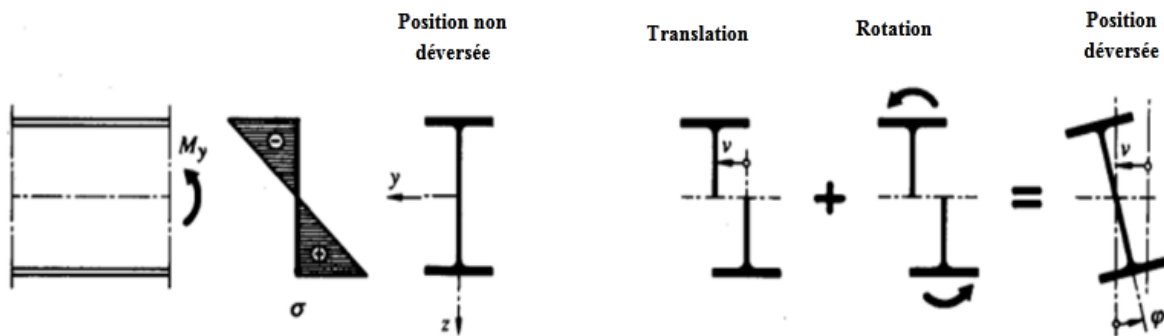


Figure II.5: Translation et rotation d'une section d'un élément de poutre sujet au déversement.

Ce raisonnement simple montre que l'on doit tenir compte, dans l'étude du déversement, non seulement de la rigidité de flexion latérale, mais aussi de la rigidité torsionnelle de la section.

II.4.3 Aspect réglementaire du déversement :

II.4.3.1. Déversement d'une poutre simple en flexion pure :

Considérons le cas fondamental utilisé pour l'étude du déversement, à savoir la poutre simple de la figure (Fig.5) sollicitée en flexion pure. En partant de l'état déformé de la barre, on peut calculer la valeur de la charge critique pour laquelle le système est en équilibre métastable. Ce cas fondamental de la poutre simple a été résolu par Timoshenko (1966) en considérant les hypothèses suivantes [8] :

- Barre parfaitement rectiligne de section bi-symétrique constante sur toute sa longueur.
- Barre idéale sans imperfections (déformation initiale, contraintes résiduelles, etc.).
- Section de la barre indéformable.
- Appuis de type « appuis à fourche ».
- Matériau infiniment élastique linéaire.
- Inertie I_z de la section faible vis-à-vis de l'inertie I_y .
- Petites déformations ($\sin \varphi = \varphi$, $\cos \varphi = 1$).

Il faut préciser ici qu'un appui à fourche correspond à un appui simple à la flexion où la rotation ϕ de la section autour de l'axe x ainsi que le déplacement latéral v sont empêchés.

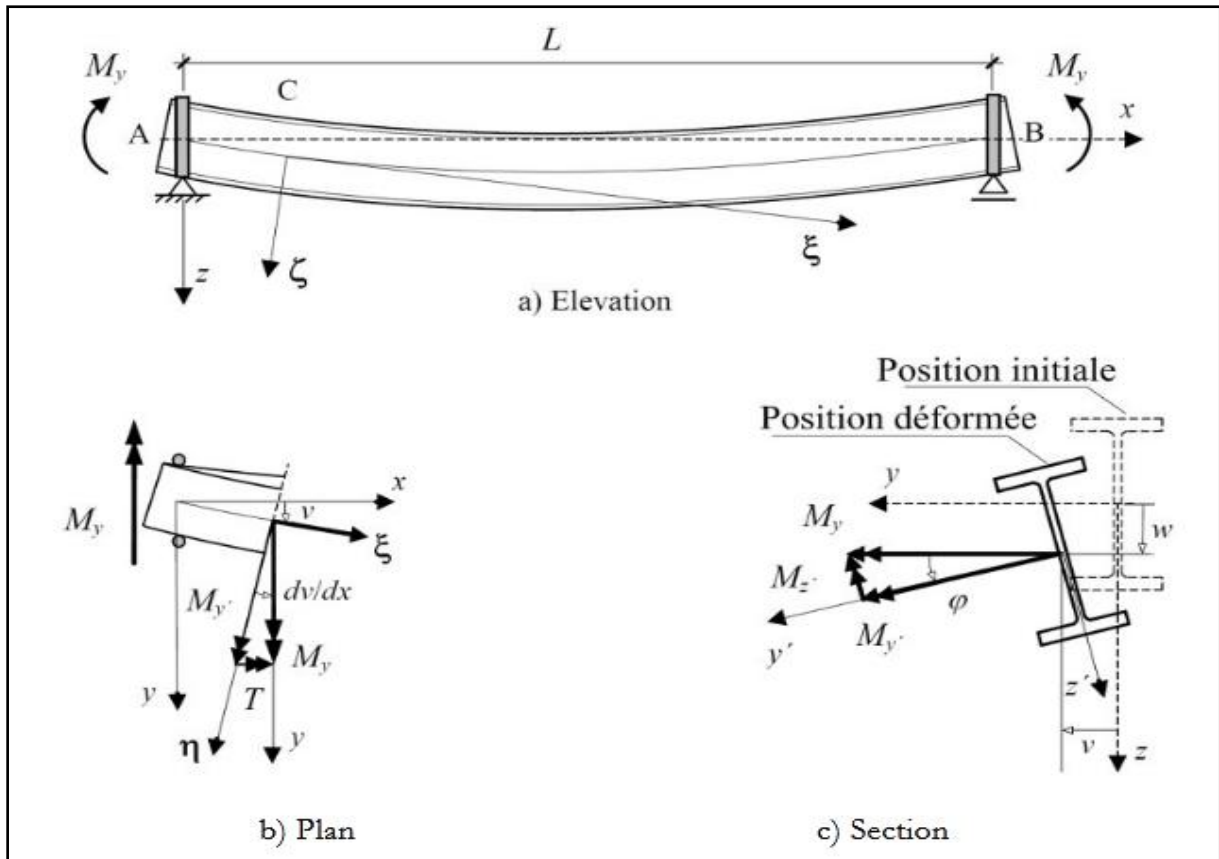


Figure II.6: Déversement d'une poutre constituée d'une section en I bi-symétrique, sollicitée en flexion pure.

On peut dès lors établir les équations différentielles relatives à cette poutre en écrivant les conditions d'équilibre par rapport au système de coordonnées (ξ, η, ζ) à l'état déformé, ce qui représente un système de trois équations à trois inconnues (v, w et ϕ) :

- Flexion selon l'axe η , en tenant compte du fait que $M\eta = M_y \cos\phi \approx M_y$:

$$EI_y \frac{d^2w(x)}{dx^2} + M_y = 0 \tag{II.1}$$

- Flexion selon l'axe ζ en tenant compte du fait que $M\zeta = M_y \sin\phi \approx M_y$:

$$EI_z \frac{d^2v(x)}{dx^2} + \phi(x) M_y = 0 \tag{II.2}$$

- Torsion autour de l'axe ξ , en tenant compte du fait que $T = M_y \sin\frac{dv}{dx} \approx M_y \frac{dv}{dx}$

$$EI_w \frac{d^3\phi(x)}{dx^3} - GK \frac{d\phi(x)}{dx} + M_y \frac{dv(x)}{dx} = 0 \tag{II.3}$$

La relation (II.1) est indépendante des deux suivantes : c'est l'équation d'une barre sollicitée en flexion pure. En dérivant une fois (II.3) et en remplaçant $d^2v(x)/dx^2$ par sa valeur tirée de (II.2), on obtient l'équation différentielle suivante :

$$EI_w \frac{d^4\varphi(x)}{dx^4} - GK \frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} - \frac{M_y^2}{EI_z} \varphi(x) = 0 \quad (\text{II.4})$$

Sa solution est du type : $\varphi(x) = A \cosh(\alpha x) + B \sinh(\alpha x) + C \sin(\beta x) + D \cos(\beta x)$.

Pour déterminer les quatre constantes d'intégration, on dispose de quatre conditions aux limites, à savoir : $\varphi = \varphi'' = 0$ pour $x = 0$ et l_D . *Le moment critique de déversement élastique* M_{crD} , pour lequel le système est en équilibre métastable, se formule finalement de la façon suivante, on remarquera que cette relation est indépendante de la limite d'élasticité f_y de l'acier, (Hirt et al. [9] et ECCS [10]) :

$$M_{crD} = \frac{\pi}{l_D} \sqrt{GKEI_z \left(1 + \frac{\pi^2 EI_w}{l_D^2 GK}\right)} \quad (\text{II.5})$$

- l_D : Longueur de déversement (distance entre deux appuis latéraux empêchant le déversement)
- G : Module de cisaillement ;
- K : Constante de torsion uniforme ;
- GK : Rigidité de torsion ;
- E : Module d'élasticité ;
- I_z : Moment d'inertie par rapport à l'axe z ;
- EI_z : Rigidité de flexion latérale ;
- I_w : Moment d'inertie sectoriel de la section ;
- EI_w : Rigidité de torsion non uniforme

II.4.3.2. Evaluation du moment critique de déversement (Méthode approximative) :

Le cas particulier de la poutre simple en flexion pure ne se rencontre pratiquement jamais dans une structure. De plus, les appuis d'une poutre sont souvent des encastremets élastiques à la flexion et à la torsion, les charges extérieures ne se réduisent pas à un simple moment de flexion et la section de la barre peut être dissymétrique (Fig.II.7).

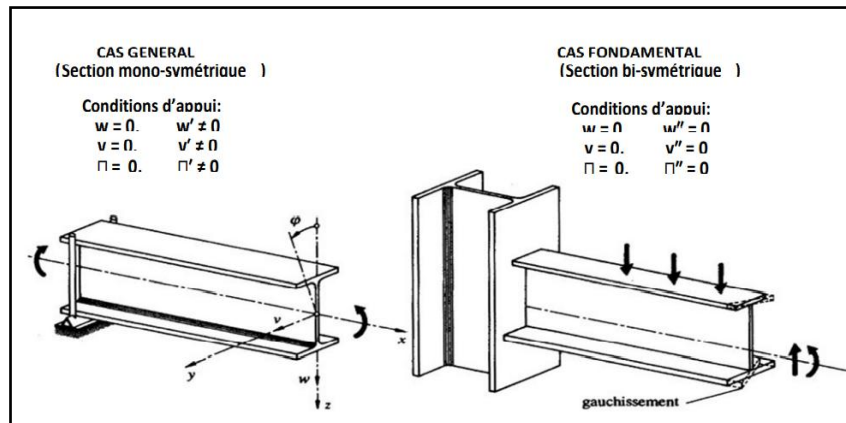


Figure II.7 : Conditions d'appui, charges et types de sections transversales.

Plusieurs chercheurs ont étudié le déversement afin de trouver une méthode de calcul plus générale, applicable à de nombreux cas pratiques. Citons parmi eux Clark et Hill [11] ainsi que Djalaly [17] qui ont proposé sur une base empirique une formule généralisée, qui tient compte de manière plus détaillée du type de chargement de la barre et de ses conditions d'appui. Les hypothèses de calcul sont identiques à celles énoncées dans la théorie de Timoshenko [8], à la différence près que la section peut être mono symétrique, qu'elle peut être chargée entre les appuis et que les conditions d'appui sont plus générales :

$$M_{crD} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{K_v K_\phi l^2 D} \left[\sqrt{(C_2 z_\alpha + C_3)^2 + \frac{I_w}{I_z} \left(\frac{GK k^2 \phi l^2 D}{\pi^2 E I_w} \right)} + (C_2 z_\alpha + C_3 \beta) \right] \quad (II.6)$$

D'où

- C_1, C_2, C_3 : Facteurs dépendant du type de chargement et des conditions d'appuis
- K_v, k_ϕ coefficients d'encastrement aux appuis
- Distance entre le centre de cisaillement C et le point d'application de la charge (positive si ce dernier est situé entre le centre de cisaillement et la semelle tendue)



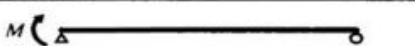
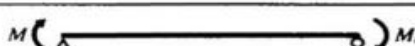


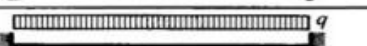
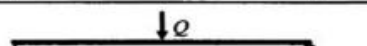
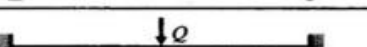
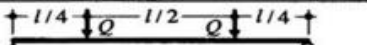
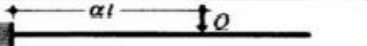

avec la caractéristique sectorielle de la section β ($\beta = 0$ pour une section bi-symétrique) définie par :

$$\beta = z_c + \frac{1}{2I_y} \int_A z(y^2 + z^2) dA \quad (II.7)$$

- Z_c Distance entre le centre de gravité G et le centre de cisaillement C (positive si le centre de cisaillement se trouve entre le centre de gravité et la semelle comprimée).

Le tableau (Tableau II.2) donne les valeurs de ces trois facteurs C1, C2 et C3 pour les cas de charges les plus courants et pour les conditions d'appui suivantes : $k_v = 1.0$ (cas usuel), 0.5 et 2.0 (pour la poutre en porte-à-faux) et $k_\varphi = 1.0$ (valeur admise normalement). Pour des systèmes statiques dont les conditions d'appui sont telles que $0.5 < k_v < 1.0$, on peut soit obtenir les facteurs C1, C2 et C3 par interpolation, soit choisir $k_v = 1.0$ (méthode conservatrice), les facteurs peuvent être trouvés dans (Boissonnade et al. [12]).

Tableau II.1 : Valeurs des facteurs C1, C2 et C3 pour $k_\varphi = 1.0$

Mode de chargement	$k_v = 1.0$			$k_v = 0.5$			$k_v = 2.0$		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
	1.00	①	1.00	1.00	①	1.14			
	1.32	①	0.99	1.51	①	2.27			
	1.88	①	0.94	2.15	①	2.15			
	2.70	①	0.68	3.09	①	1.55			
	2.75	①	0.00	3.15	①	0.00			
	1.13	0.46	0.53	0.97	0.30	0.98			
	1.28	1.56	0.75	0.71	0.65	1.07			
	1.36	0.55	1.73	1.07	0.43	3.06			
	1.56	1.27	2.64	0.94	0.71	4.80			
	1.05	0.43	1.12	1.01	0.41	1.89			
							$\frac{1.28}{\alpha}$	0.43	②
							2.05	0.83	②

① Sans influence s'il n'y a pas de charge transversale

② Sans influence pour une section bi-symétrique

II.4.3.3. Le moment critique de déversement selon L’Eurocode 3:

L’Eurocode 3 [13] dispose de plusieurs méthodes afin de tenir compte du cas de déversement : un cas général, Un cas ajusté aux profilés laminés ou sections soudées équivalentes:

- Une méthode simplifiée,
- Une méthode générale peut être utilisée aussi bien pour le déversement que d’autres

- cas d'instabilités. L'organisation « Access Steel », d'après un accord avec les principaux instituts techniques en construction métallique en Europe, a publié un document « Non-Conflicting, Complementary Information » (NCCI) afin de déterminer M_{cr} [18] :

$$M_{cr,EC} = \frac{C_1 \pi^2 E I_z}{(KL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{K}{K_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(KL)^2}{\pi^2} \cdot \frac{G I_t}{E I_z} + (C_2 Z_g)^2} - C_2 Z_g \right] \quad (\text{II.8})$$

D'après cette formule qui a été adoptée par l'Eurocode 3 [13], il est possible de constater que l'EC3 est ouvert à une grande variété de situations par rapport aux autres règlements en vigueur tel que l'AISC [19] (l'Institut Américain de la Construction Métallique). Cependant, l'EC3 est complexe mais essaie de couvrir le plus large éventail de cas possibles, et dispose de bien des manières pour s'ajuster au cas étudié (plusieurs méthodes pour approcher un problème).

II.4.3.4. Calcul simplifié du moment critique de déversement élastique (la norme SIA 161) :

Il est possible de recourir à une méthode de calcul simplifiée pour déterminer le moment de déversement (la simplification consiste à ne pas utiliser les coefficients K_v K_ϕ ; C_1 , C_2 et C_3), à condition que les hypothèses suivantes soient remplies :

- Le système statique est une poutre simple avec appuis à fourche ($v = v'' = 0$ et $\phi = \phi'' = 0$);
- La section est bi-symétrique et indéformable ;
- Les charges agissent dans le plan de symétrie de la section et leur point d'application au centre de cisaillement ;

Un tel principe de calcul simplifié est d'ailleurs repris dans la norme SIA 161. Examinons d'abord le moment critique de déversement élastique M_{crD} donné par le cas fondamental de la poutre simple en flexion pure , qui peut s'exprimer, en séparant l'influence de *la torsion uniforme et non- uniforme*, de la façon suivante :

$$M_{cr,EC} = \left[\sqrt{\frac{\pi^2 G K E I_z}{l^2_D} + \frac{\pi^4 E I_w E I_z}{l^4_D}} \right] \quad (\text{II.9})$$

Historiquement, on a en général utilisé la contrainte critique de déversement élastique σ_{crD} , qui est liée au moment critique de déversement élastique M_{crD} de la façon suivante :

$$\sigma_{crD} = \frac{M_{crD}}{W_y} \quad (\text{II.10})$$

W_y : est le moment de résistance par rapport à la fibre moyenne des ailes.

Avec (II.10), la contrainte critique de déversement élastique σ_{crD} peut donc se formuler ainsi:

$$\sigma_{crD} = \sqrt{\left[\frac{\pi}{l_D w_y} \sqrt{GK EI_z} \right]^2 + \left[\frac{\pi^2 E}{l_D^2} \sqrt{\frac{I_w I_z}{W_y^2}} \right]^2} \quad (\text{II.11})$$

En définissant les termes entre crochets par la composante de torsion uniforme σ_{Dv} et, respectivement, non uniforme σ_{Dw} la contrainte de déversement élastique peut donc s'écrire pour une section bi-symétrique sous la forme d'une somme vectorielle de deux composantes, représentant d'une part la résistance en *torsion uniforme (St-Venant)* [20] de la poutre et d'autre part la résistance en *torsion non-uniforme* :

$$\sigma_{crD} = \sqrt{\sigma_{Dv}^2 + \sigma_{Dw}^2} \quad (\text{II.12})$$

- σ_{Dv} : la composante de la torsion uniforme.
- σ_{Dw} : la composante de la torsion non-uniforme.

En général, une barre sollicitée par un moment de torsion résiste simultanément en torsion uniforme et en torsion non-uniforme ; on dit qu'elle travaille en torsion mixte. Le moment de torsion extérieur est équilibré d'une part par un flux de cisaillement (torsion uniforme), et d'autre part par des contraintes normales associées à des contraintes tangentielles (torsion non-uniforme). La part de ces deux modes de résistance dépend principalement de la géométrie de la section transversale, mais également de la portée et des conditions d'appui.

Lors de calcul de la résistance ultime au déversement d'une poutre, on peut, suivant le cas, négliger l'une des deux résistances à la torsion (Fig. II.8). Un profilé tubulaire résiste essentiellement en torsion uniforme, car la composante de torsion non-uniforme σ_{Dw} peut être négligée.

Pour une poutre composée d'âme pleine, dont la longueur de déversement est faible, c'est par contre la composante de torsion uniforme σ_{Dv} qui peut être négligée : la section résiste donc essentiellement en torsion non-uniforme. Un profilé laminé résiste quant à lui en torsion mixte, mais la composante de torsion uniforme (St-Venant) σ_{Dv} est souvent prépondérante, comme le montre la figure (Fig. II.8).

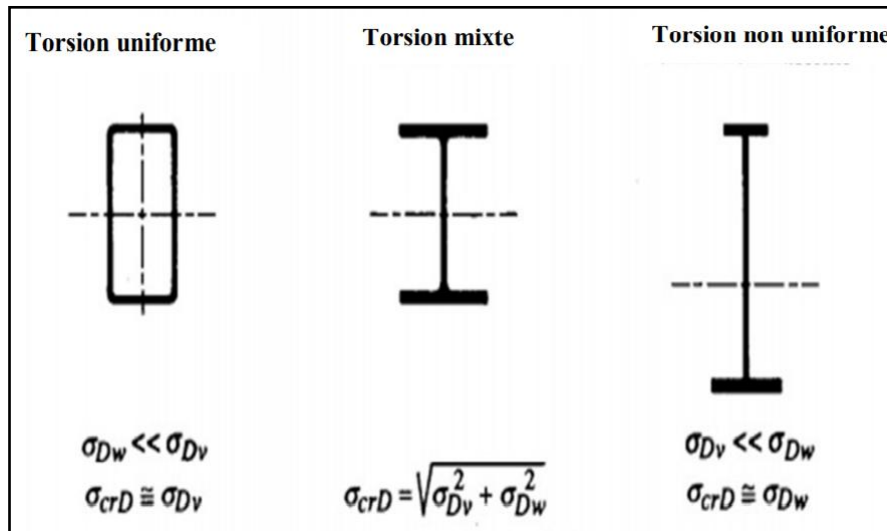


Figure II.8: Mode de résistance à la torsion de quelques sections.

II.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé une analyse analytique et réglementaire du déversement des poutres. Beaucoup de paramètres interviennent dans le calcul des charges critiques (Moment critique). Les principaux paramètres intervenants sont la forme de la section transversale (le moment d'inertie par rapport à l'axe faible et les caractéristiques géométriques de torsion).

Le règlement européen l'Eurocode 3 des structures en acier présente des formules pour prédire la valeur de résistance vis-à-vis des phénomènes d'instabilité de déversement traité dans ce travail, ainsi pour prédire les charges de résistance d'instabilités dans le domaine poste élastique. Pour une analyse rigoureuse, on est dans l'obligation de faire appel à des modèles numérique et à la modélisation par la Méthode des éléments fini.

Chapitre –III–

Elaboration d'un modèle analytique.

III.1. Introduction :

Dans cette étude, nous intéressons au flambement latéral par torsion des poutres à une seule travée avec des sections en I bi-symétriques. Ils sont élastiquement retenus contre le gauchissement et contre la rotation dans le plan de flambement par torsion latérale (c'est-à-dire contre la rotation latérale) aux nœuds de support.

En flexion par rapport au grand axe de raideur de la section, on trouve des conditions d'appui simples au les soutiens. Dans l'analyse du déversement par torsion latérale, la méthode énergétique a été utilisée. Les fonctions de la rotation et du déplacement latéral de la poutre ont été approximées avec poutre ont été approximées avec des fonctions couplées (fonctions trigonométriques et polynômes de puissance).

Des programmes de « calculs » numériques ont été développées et des formules d'approximation ont été dérivées pour estimer le moment critique élastique pour déversement par torsion latérale. Des calculs détaillés ont été faites pour des poutres avec des valeurs différentes de l'indice de fixité (contre le gauchissement κ_ω et contre rotation κ_ν) avec l'hypothèse de la symétrie des conditions aux limites par rapport à la poutre mi-portée. Les résultats reçus ont été comparés aux résultats FEM (*LTBeam*).

III.2. Maintenu élastique contre le gauchissement et contre la rotation latérale:

Le diagramme statique de la poutre retenue élastiquement contre le gauchissement et contre les la rotation aux nœuds de support est illustrée à la figure 1. Les ressorts en couleur représentent symboliquement le maintien élastique dans les sections de support: c'est-à-dire en rouge - retenue de gauchissement (α_ω) et en bleu - latéral blocage en rotation (α_ν).

Le degré de maintien élastique contre le gauchissement ε_ω peut être déterminé à partir de la formule :

$$\varepsilon_\omega = \frac{\alpha_\omega L}{EI_\omega} \quad (\text{III.1})$$

où : α_ω présente la rigidité du maintien élastique contre le gauchissement selon la formule suivante :

$$\alpha_\omega = \frac{-B}{\frac{d\theta}{dx}} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- B est le bimoment au niveau du support de la poutre,

- $\theta(x)$ est l'angle de torsion,
- $\frac{d\theta}{dx}$ est le gauchissement de la section.

Le degré de retenue élastique ε_ω selon formule (1), comprise entre $\varepsilon_\omega = 0$ pour une liberté totale de gauchissement à $\varepsilon_\omega = \infty$ pour une prévention complète du gauchissement.

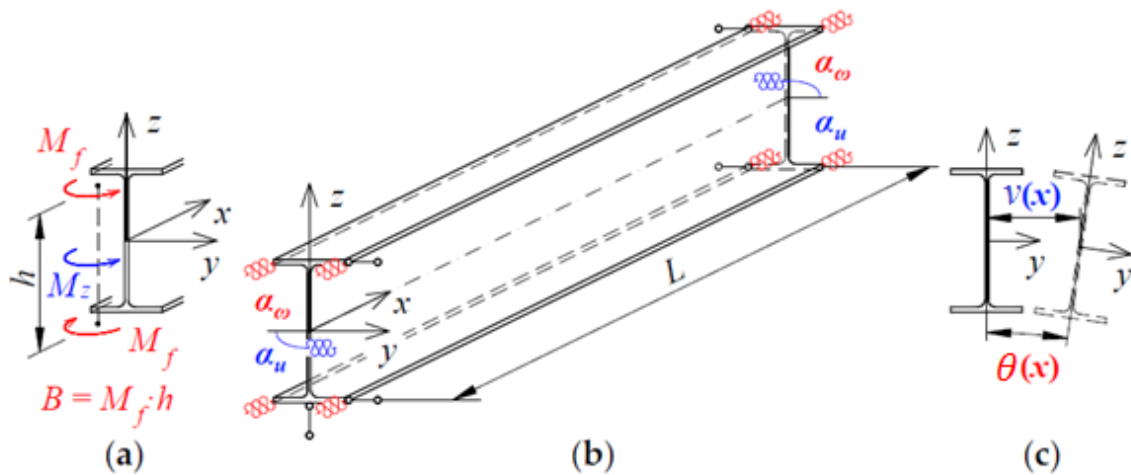


Figure III.1: Diagramme statique de la poutre : (a) bimoment B et moment M_z à l'appui, (b) maintien élastique contre le gauchissement (α_ω) et contre la rotation latérale (α_u), (c) angle de torsion $\theta(x)$ et déplacement latéral $v(x)$.

Dans cette étude, le degré de retenue élastique contre la rotation dans le plan de déversement latérale par torsion ε_u , a été dérivé. Il était écrit sous la forme suivante :

$$\varepsilon_v = \frac{\alpha_v L}{EI_z} \tag{III.3}$$

où : α_u présente la rigidité du maintien élastique contre la rotation selon la formule suivante :

$$\alpha_v = \frac{M_z}{\frac{dv}{dx}} \tag{III.4}$$

Avec :

- M_z est moment fléchissant par rapport au petit axe de la section au niveau de l'appui,
- $v(x)$ est le déplacement latéral,
- $\frac{dv}{dx}$ est la rotation autour de l'axe z de la section.

Le degré du maintien élastique ε_v , selon la formule (III.3), va de $\varepsilon_v = 0$ pour une rotation complète libre, à $\varepsilon_v = \infty$ pour une prévention complète de la rotation dans le plan de déversement par torsion latérale.

Afin de prendre en compte, de manière explicite, le maintien élastique de la poutre, dans l'angle de torsion $\theta(x)$ et le déplacement latérale $v(x)$, les indices de fixité sans dimension contre le gauchissement κ_ω et contre la rotation latérale κ_v ont été introduits selon les formules suivantes :

$$k_\omega = \frac{\alpha_\omega L}{2EI_\omega + \alpha_\omega L} \quad (\text{III.5-a})$$

$$k_v = \frac{\alpha_v L}{2EI_z + \alpha_v L} \quad (\text{III.5-b})$$

Les indices de fixité vont de $\kappa_\omega = 0$ ($\kappa_v = 0$) pour une totale liberté de gauchissement ou de rotation latérale, respectivement à $\kappa_\omega = 1$ ($\kappa_v = 1$) pour un blocage complet du gauchissement ou de la rotation latérale. Les relations inverses, c'est-à-dire α_ω (κ_ω) et α_v (κ_v), ont la forme suivante :

$$\alpha_\omega = \frac{2k_\omega EI_\omega}{(1-k_\omega)L} \quad (\text{III.6-a})$$

$$\alpha_v = \frac{2k_v EI_z}{(1-k_v)L} \quad (\text{III.6-b})$$

Les relations entre le degré de maintien élastique ε_ω et ε_v (III.1) et (III.3), et l'indice de fixité k_ω et k_v (III.5-a) et (III.5-b), sont les suivants:

$$k_\omega = \frac{\varepsilon_\omega}{2 + \varepsilon_\omega} \quad (\text{III.7-a})$$

$$k_v = \frac{\varepsilon_v}{2 + \varepsilon_v} \quad (\text{III.7-b})$$

$$\varepsilon_\omega = \frac{2k_\omega}{1-k_\omega} \quad (\text{III.7-c})$$

$$\varepsilon_v = \frac{2k_v}{1-k_v} \quad (\text{III.7-d})$$

III.3. Etude de déversement latéral (LTB) des poutres :

III.3.1. Energie potentielle totale:

La méthode énergétique a été utilisée pour déterminer le moment critique (M_{cr}) d'une poutre à une travée avec section en I bi-symétrique tout en tenant compte des contraintes élastiques (κ_ω , κ_v) aux nœuds d'appui.

Notant par U l'énergie de déformation de l'élément de poutre, et par W la travail dépensé par les charges externes. Lorsque le déversement latéral se produit, nous pouvons utiliser le principe variationnel de l'énergie potentielle totale noté :

$$\Pi = U_{s,1} + U_{s,2} + U_{s,3} - W \quad (\text{III.8})$$

où :

- $U_{s,1}$: l'énergie de déformation élastique de flexion et de torsion de la poutre ;
- $U_{s,2}$: l'énergie de la retenue élastique contre le gauchissement;
- $U_{s,3}$: l'énergie de la contrainte élastique contre la rotation latérale ;
- W : le travail effectué par les forces externes.

L'énergie de déformation élastique de la poutre en flexion et en torsion peut être exprimée par l'équation :

$$U_{s,1} = \frac{1}{2} \int_L \left[EI_y \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 + EI_z \left(\frac{d^2 v}{dx^2} \right)^2 + EI_\omega \left(\frac{d^2 \theta}{dx^2} \right)^2 + GJ \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 \right] dx \quad (\text{III.9})$$

Où: E est le module de Young et G est le module de cisaillement. Les paramètres géométriques sont notés I_y , I_z , I_ω et J qui représentent respectivement, les seconds moments autour des axes y et z , le gauchissement et les constantes de torsion.

L'énergie de la retenue élastique contre le gauchissement ($U_{s,2}$) est donnée par :

$$U_{s,2} = \frac{\alpha_\omega}{2} \left[\left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=0}^2 + \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=L}^2 \right] \quad (\text{III.10})$$

L'énergie de la retenue élastique contre la rotation latérale ($U_{s,3}$) est exprimée par:

$$U_{s,3} = \frac{\alpha_v}{2} \left[\left(\frac{dv}{dx} \right)_{x=0}^2 + \left(\frac{dv}{dx} \right)_{x=L}^2 \right] \quad (\text{III.11})$$

Le travail effectué par les forces extérieures est fonction du diagramme de chargement et de la coordonnée du point d'application de la charge. Par exemple, pour une poutre simplement appuyée (Figure 2), avec une charge uniformément répartie, pour une hauteur de charge (e_z) du point d'application de la charge sur la hauteur de la section, le travail effectué par les forces externes peut s'écrire comme suit :

$$W = \int_L \left[M_y \frac{d^2 w}{dx^2} + M_y \theta \frac{d^2 v}{dx^2} + q_z e_z \frac{\theta^2}{2} \right] dx \quad (\text{III.12})$$

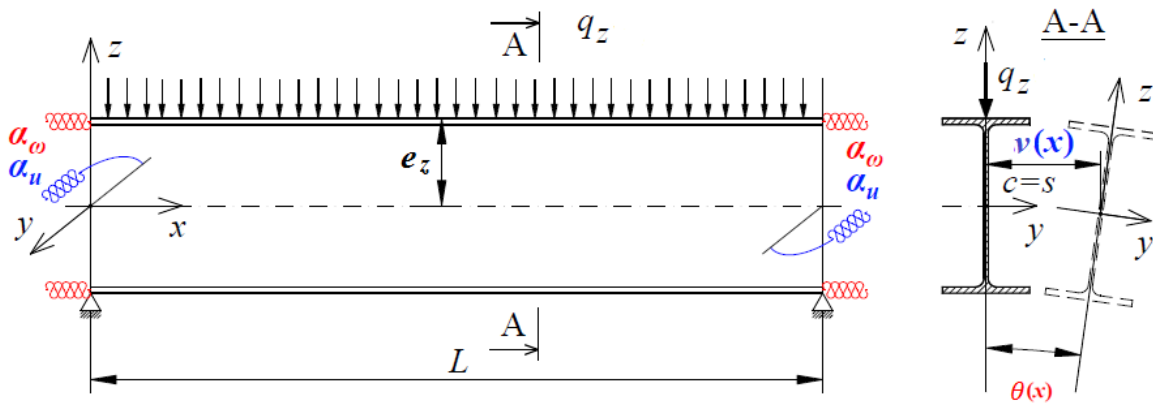


Figure III.2: Une poutre simplement appuyée, avec une charge uniformément répartie, pour une hauteur de charge (e_z).

Cette étude porte sur des poutres simplement appuyées. Le moment de flexion pour une poutre simplement supportée soumise à une charge uniformément répartie peut être exprimé comme suit :

$$M_y = +\frac{1}{2} q_z x (L - x) \quad (\text{III.13})$$

L'équation (III.11) dans (III.10):

$$W = \int_L \left[\frac{1}{2} q_z x (L - x) \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{1}{2} q_z x (L - x) \theta \frac{d^2 v}{dx^2} + q_z e_z \frac{\theta^2}{2} \right] dx \quad (\text{III.14})$$

Substituant (III.9), (III.10), (III.11) et (III.14) dans (III.8) on obtient:

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{1}{2} \int_L \left[EI_y \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 + EI_z \left(\frac{d^2 v}{dx^2} \right)^2 + EI_\omega \left(\frac{d^2 \theta}{dx^2} \right)^2 + GJ \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 \right] dx \\ + \frac{\alpha_\omega}{2} \left[\left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2_{x=0} + \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2_{x=L} \right] + \frac{\alpha_v}{2} \left[\left(\frac{dv}{dx} \right)^2_{x=0} + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2_{x=L} \right] \\ - \int_L \left[\frac{1}{2} q_z x(L-x) \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{1}{2} q_z x(L-x) \theta \frac{d^2 v}{dx^2} + q_z e_z \frac{\theta^2}{2} \right] dx \end{aligned} \quad (\text{III.15})$$

Les équations d'équilibre sont à dériver à partir de *condition stationnaire de potentiel total*. En désignant par U l'énergie de déformation de l'élément et par W le *travail des charges conservatrices appliquées*, la *condition stationnaire de potentiel total*, donné par :

$$\delta \Pi = \delta(U - W) = 0 \quad (\text{III.16})$$

Où (δ) dénote la variation virtuelle.

III.3.2. Les solutions numériques de déversement latéral:

Conformément à la procédure de calcul du Ritz, il est primordial dans la première étape de sélectionner les fonctions de forme de déplacement. Celles-ci sont choisies pour satisfaire uniquement les conditions aux limites. La résolution de la valeur propre d'un système structural continu peut être exprimée en terme de combinaison linéaire des fonctions de forme sélectionnées. Par conséquent, dans le cas de poutre simplement appuyée, la fonction trigonométrique suivante sera utilisée pour le déplacement vertical $w(x)$ à savoir:

$$w(x) = \sum_{i=1}^3 w_i \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) \quad (\text{III.17})$$

Avec: w_i sont les amplitudes de déplacements associées.

Dans cette étude, dans laquelle le déversement latéral par torsion des poutres supportées par des fourches a été analysé, la fonction de l'angle de torsion de la section a été approximée à l'aide de fonctions trigonométriques qui décrivent « la fonction de flèche » de la poutre articulée $\left(\sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right)\right)$. Pour rendre compte de la retenue élastique contre le gauchissement dans la section de support de poutre, la fonction d'angle de torsion $\theta(x)$ a été étendu. Cela a été fait en introduisant des polynômes supplémentaires qui décrivent « la fonction de flèche » de la poutre retenue (tableau 1, polynômes P_{Ui}). Les fonctions trigonométriques ont été couplés à

des polynômes « restreints » (P_{U_i}) au moyen de l'indice de fixité contre le gauchissement κ_ω selon la formule suivante:

$$\theta(x) = \sum_{i=1}^3 \theta_i \left((1 - k_\omega) \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) + k_\omega \cdot P_{U_i} \right) \quad (\text{III.18})$$

Dont: θ_i sont les amplitudes de rotations associées. Les polynômes P_{U_i} sont donnés dans la tableau suivant:

Tableau III.1: Fonctions Polynômiales P_{U_i} utilisées .

N°	polynômes
1	$P_{U1} = \left(\frac{x}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 + \left(\frac{x}{L}\right)^4$
2	$P_{U2} = \left(\frac{x}{L}\right)^2 - 4\left(\frac{x}{L}\right)^3 + 5\left(\frac{x}{L}\right)^4 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^5$
3	$P_{U3} = 2\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 13\left(\frac{x}{L}\right)^3 + 29\left(\frac{x}{L}\right)^4 - 27\left(\frac{x}{L}\right)^5 + 9\left(\frac{x}{L}\right)^6$

Les fonctions trigonométriques utilisés $\left(\sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right)\right)$ satisfont les conditions aux limites de la fonction d'angle de torsion pour le support de fourche ($\theta = 0$, $\theta'' = 0$ pour $x = 0$ et $x = L$), et pour le maintien total P_{U_i} ($\theta = 0$, $\theta' = 0$ pour $x = 0$ et $x = L$), respectivement.

Dans cette étude, pour tenir compte de la retenue élastique de la poutre contre la rotation latérale au nœuds supports, la fonction de déplacement (déviation latérale) (v) a été écrite de manière analogue à (III.18). Ainsi les fonctions trigonométriques « articulés » $\left(\sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right)\right)$ et les polynômes « contraints » (P_{U_i}) ont été « couplés » au moyen de l'indice de fixité κ_u suivant l'expression suivante:

$$v(x) = \sum_{i=1}^3 v_i \left((1 - k_u) \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) + k_u \cdot P_{U_i} \right) \quad (\text{III.19})$$

Dans laquelle: v_i sont les amplitudes de rotations associées. Les polynômes P_{U_i} sont les mêmes que ceux donnés dans la tableau III.1.

De même, les fonctions trigonométriques $\left(\sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right)\right)$ satisfont les conditions aux limites de la déviation latérale (v) pour le support de fourche ($v = 0$, $v'' = 0$ pour $x = 0$ et $x = L$), et pour le maintien total P_{U_i} ($v = 0$, $v' = 0$ pour $x = 0$ et $x = L$), respectivement.

Les fonctions (III.18) et (III.19) permettent de modéliser les conditions aux limites aux nœuds pour la retenue ou la maintien contre le gauchissement et contre la rotation latérale pour des valeurs arbitraires (c'est-à-dire de 0 à 1) des indices de fixité κ_ω et κ_u .

Substituant Eqs (III.17), (III.18) et (III.19) dans Eq (III.15) et (III.16), 3X3 équations d'équilibre sont dérivées en utilisant l'opérateur gradient comme suit:

$$\{f\} = \text{grad}((U - W), \{d\}) = \{0\} \quad (\text{III.20})$$

Dont $\{f\}$ est le vecteur des équations d'équilibre, et le vecteur $\{d\}$ est donné par:

$$\{d\} = \{\{v_i\}, \{w_i\}, \{\theta_i\}\}^T \quad (\text{III.21})$$

Après la détermination du vecteur $\{f\}$, on obtient la matrice tangente $[K_t]$ qui est définie comme étant la matrice *Jacobian* de $\{f\}$. Les charges critiques de déversement seront déterminées par la condition de singularité de la matrice tangente: ($\det K_t = 0$).

Pour déterminer Mcr , un programme de calculs numériques, a été développé dans l'environnement du Maple V18. Le programme permet de déterminer la charge critique en fonction des indices de fixité (κ_ω et κ_u), pour des paramètres géométriques arbitraires de la section en I bi-symétrique. Une valeur arbitraire de la coordonnée (e_z) du point d'application de la charge. Au programme, le premier trois termes de la fonction d'angle de torsion selon (III.18) et les trois premiers termes du déplacement latéral de déviation selon (III.19) étaient employés.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, un modèle analytique a été formulé pour fournir les charges critiques de déversement latéral par torsion, pour les poutres simplement appuyée. Ces poutres sont élastiquement retenus contre le gauchissement et contre la rotation dans le plan de flambement par torsion latérale (c'est-à-dire contre la rotation latérale) aux nœuds de support. Le modèle est basé sur le principe de l'énergie potentielle totale réalisée dans le contexte de comportement élastique linéaire. Les fonctions de la rotation et du déplacement latéral de la poutre ont été approximées avec des fonctions couplées (fonctions trigonométriques et polynômes de puissance).

Pour la validité du modèle proposé, les résultats de la méthode proposée seront comparées avec celles obtenues par la simulation numérique en utilisant le logiciel *LTBeam* dans le chapitre suivant.

Chapitre –IV–

Résultats et discussions.

IV.1. Introduction:

Pour vérifier les résultats de calculs numériques effectués selon le programme développé sous Maple, le logiciel de calcul par éléments finis *LTBeam* a été utilisé. Le logiciel permet l'adoption des conditions aux limites classiques c'est-à-dire un support de fourche ou une fixité complète. En outre, il tient compte de la retenue élastique de la poutre contre le gauchissement et contre la rotation dans le plan de déversement latéral par torsion.

Par souci de comparaison, lors de la vérification des calculs, des valeurs prédéterminées des indices de la fixité k_ω et k_v ont été supposées. Dans ce cas, la rigidité de la retenue élastique contre le gauchissement (α_ω) et la raideur de la retenue élastique contre la rotation latérale (α_v), qui sont nécessaires pour faire les calculs sous *LTBeam* ont été déterminés à partir de la formule (III.6 a-b) du chapitre précédent. La figure IV.1 montre la forme du déversement latéral par torsion de la poutre pour le moment critique déterminé avec le programme *LTBeam*.

Cette étude comparative implique l'analyse de stabilité au déversement des poutres en variant les indices de fixités k_ω et k_v , ainsi que le cas de chargement (charge répartie, concernée, moments aux extrémités...), avec les mêmes conditions aux limites (simplement appuyées).

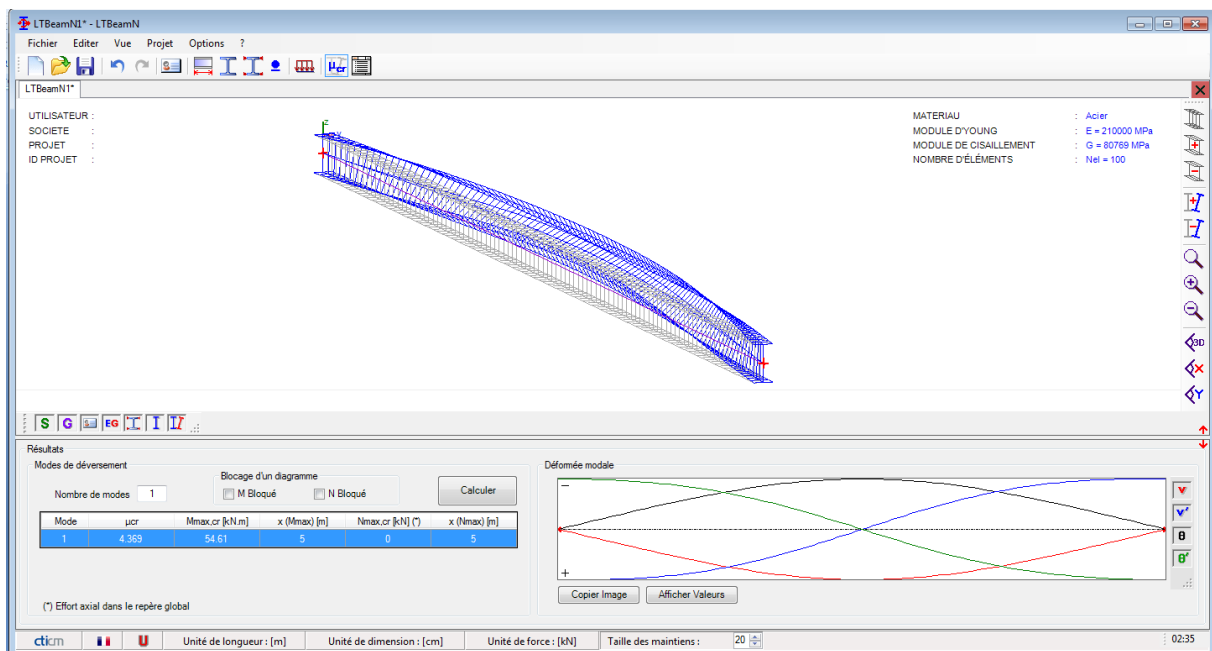


Figure IV.1: Exemple de poutre modélisée à l'aide du logiciel *LTBeam* : le moment critique de déversement de la poutre par torsion et forme déformée de la poutre.

IV.2. Validations numériques :

Dans tous les cas structurels envisagés dans les comparaisons, les résultats présentés comprennent : les moments critique M_{cr} (q_{cr}) donnés au moyen du modèle proposé, l'analyse par éléments finis $M_{cr,FEM}$ ($q_{cr,FEM}$).

Les erreurs relatives associées aux valeurs (M_{cr}) et ($M_{cr,FEM}$) sont données par l'expression suivante:

$$\Delta = \frac{M_{cr} - M_{cr,FEM}}{M_{cr,FEM}} (\%) \quad (IV.1)$$

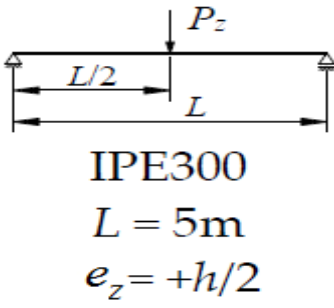
Pour faire une analyse comparative, des poutres en acier en IPE300, de portée $L = 5$ m ont été considérées. Dans tous les exemples, le module d'élasticité longitudinal et le module de cisaillement du matériau sont respectivement: $E=210GPa$ et $G=80,77GPa$, avec un coefficient de Poisson égal à $0,3$. Dans les exemples traités, il s'agit des poutres simplement appuyées sous:

- Une charge concentrée au milieu;
- Un chargement réparti (Uniforme et triangulaire);
- Des moments concentrés aux extrémités.

Les charges transversales ont été appliquée à la semelle supérieure ($e_z = +h/2$), lorsque les charges étaient des moments concentrés aux appuis (tableau 3), un intervalle de la variation du rapport des moments ($0,25 \leq \psi \leq 1$) a été pris en compte pour les valeurs suivantes: $\psi = \{ 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 1 \}$. Des analyses ont été effectuées pour une variation de l'indice de fixité contre le gauchissement κ_ω (de 0 à 1) et contre la rotation latérale κ_v (de 0 à 1).

Les calculs ont été effectués pour différents combinaisons des valeurs des indices κ_ω et κ_v . Pour chacune des poutres analysées, le moment critique pour le déversement latérale par torsion a été estimé avec le modèle présent en utilisant le programme développé sous Maple, puis comparé avec les valeurs obtenues à partir de *FEM (LTBeam)*. Les analyses cumulatives des résultats (pour les cas inclus dans le présent travail) sont présenté dans les tableaux suivants.

Tableau IV.1: Comparaison de M_{cr} pour poutre IPE300 ($L = 5\text{m}$)
sous charge concentrée appliquée à mi-portée de la poutre .

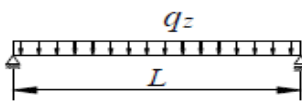
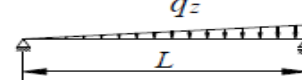
N°	Cas	k_w	k_v	Moment critique M_{cr} (KN.m)		
				LTBeam	Modèle présent	$\Delta(\%)$
1		0.00	0.00	111.20	110.00	-1.08
2			0.25	117.20	115.98	-1.04
3			0.50	124.40	123.37	-0.83
4			0.75	133.40	132.72	-0.51
5			0.90	140.10	139.36	-0.53
6			1.00	145.10	144.24	-0.59
7		0.25	0.00	117.50	116.37	-0.96
8			0.25	123.90	122.76	-0.92
9			0.50	131.60	130.66	-0.71
10			0.75	141.30	140.67	-0.45
11			0.90	148.30	147.78	-0.35
12			1.00	153.80	153.09	-0.46
13		0.50	0.00	127.40	126.78	-0.49
14			0.25	134.50	133.82	-0.51
15			0.50	143.00	142.52	-0.34
16			0.75	153.60	153.56	-0.03
17			0.90	161.40	161.42	0.01
18			1.00	167.40	167.45	0.03
19		0.75	0.00	145.70	146.84	0.78
20			0.25	153.90	155.04	0.74
21			0.50	163.70	165.19	0.91
22			0.75	176.00	178.05	1.16
23			0.90	185.00	187.21	1.19
24			1.00	191.90	194.58	1.40
25		0.90	0.00	166.80	170.60	2.28
26			0.25	176.10	180.03	2.23
27			0.50	187.40	191.95	2.43
28			0.75	201.30	206.29	2.48
29			0.90	211.50	216.71	2.46
30			1.00	219.40	225.59	2.82
31		1.00	0.00	191.80	191.82	0.01
32			0.25	202.30	202.45	0.07
33			0.50	215.00	215.52	0.24
34			0.75	230.50	231.96	0.63
35			0.90	241.90	243.63	0.72
36			1.00	250.50	253.73	1.29

Le tableau IV.1 liste des exemples de résultats de calculs obtenus pour une poutre IPE300, avec une portée de $L = 5$ m, chargé avec une force concentrée appliquée à la semelle supérieure ($e_z = +h/2$) à mi-portée.

Par rapport à *LTBeam*, les résultats obtenus par le modèle proposé (programme sous Maple) sont en bon accord avec ceux obtenus par la simulation numérique en éléments finis. Cependant, les moments critiques de déversement latéral évalués par le modèle proposé atteignent des approximations raisonnables. De ce fait, des différences (erreurs relatives) varient de $\Delta = -1,08$ à $\Delta = +2,82$ % ont été observées.

Le tableau IV.2 répertorie des exemples de résultats de calculs pour la poutre IPE300 sous une charge répartie (uniforme et triangulaire), d'une longueur $L = 5$ m, et les valeurs sélectionnées des indices κ_w et κ_v .

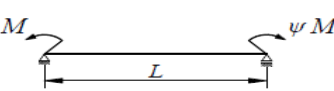
Tableau IV.2: Comparaison de M_{cr} pour poutre IPE300 ($L = 5$ m)
sous charge répartie .

N°	Cas	k_w	k_v	Moment critique M_{cr} (KN.m)		
				LTBeam	Modèle présent	$\Delta(\%)$
1	 IPE300 $L = 5$ m $e_z = +h/2$	1.00	0.00	177.20	176.34	-0.49
2		0.90	0.25	163.10	168.08	3.05
3		0.75	0.50	152.80	155.27	1.62
4		0.50	0.75	145.70	146.80	0.75
5		0.25	0.90	142.80	143.40	0.42
6		0.00	1.00	141.60	139.58	-1.43
7	 IPE300 $L = 5$ m $e_z = +h/2$	1.00	0.00	180.60	176.34	-2.36
8		0.90	0.25	165.90	168.08	1.31
9		0.75	0.50	155.20	155.27	0.05
10		0.50	0.75	147.70	146.80	-0.61
11		0.25	0.90	144.80	143.40	-0.97
12		0.00	1.00	143.50	139.58	-2.73

Outre la comparaison des valeurs de M_{cr} , les résultats compilés dans le tableau IV.2 peuvent être confirmés par la valeur de l'erreur relative Δ qui ne dépasse pas 3,05%. Ce qui confirme l'efficacité du modèle proposé pour prédire le moment critique de déversement.

De même, le tableau IV.3 montre une comparaison entre les résultats du modèle ainsi que du *LTbeam* mais pour une poutre sous des moments concentrés aux extrémités avec des rapport des moments: $\psi = \{0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 1\}$, et de différentes valeurs des indices κ_ω et κ_ν .

Tableau IV.3: Comparaison de M_{cr} pour poutre IPE300 ($L = 5\text{m}$) sous des moments aux extrémités .

N°	Cas	k_w	k_ν	ψ	Moment critique M_{cr} (KN.m)		
					LTBeam	Modele present	$\Delta(\%)$
1	 IPE300 $L = 5\text{m}$	0.00	1.00	0.25	399.30	397.87	-0.36
2		0.50	0.50	0.50	222.20	223.19	0.45
3		0.75	0.75	0.75	259.30	267.64	3.22
4		1.00	1.00	1.00	342.40	340.96	-0.42

Les résultats du modèle proposé sont toujours en bon accord avec ceux de la simulation numérique en éléments finis *LTbeam*. De ce fait, des erreurs relatives varient de $\Delta = -0,42$ à $\Delta = +3,22\%$ ont été observées pour les différentes valeurs de ψ .

IV.3. Résultats et applications :

Dans le calcul numérique, les effets de la longueur de la poutre, les valeur de l'indice de fixité au gauchissement κ_ω , les valeurs de l'indice de fixité contre la rotation latérale κ_ν , et de l'excentricité des charges verticales sont prises en compte pour analyser le déversement latéral poutres de sections bi-symétriques, tout en conservant les mêmes conditions aux limites (poutres simplement appuyées).

IV.3.1. Effet des indices de fixité sur le moment critique de déversement:

Les figures IV.2; IV.3 et IV.4 présentent la variation du moment critique M_{cr} pour une poutre constituée d'un profilé IPE300 avec un portée $L = 5,00\text{m}$, en fonction de la valeur de l'indice de fixité contre la rotation latérale $\kappa_\nu = \{0 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 0,9 ; 1\}$, et pour des valeurs sélectionnées de l'indice de fixité au gauchissement κ_ω (de 0 à 1).

Une force concentrée ou une charge uniformément répartie a été appliquée à la semelle supérieure de la poutre ($e_z = +h/2$), et des moments aux extrémités ($\psi = 1$). Les moments critiques de la poutre ont été déterminés avec le programme élaboré.

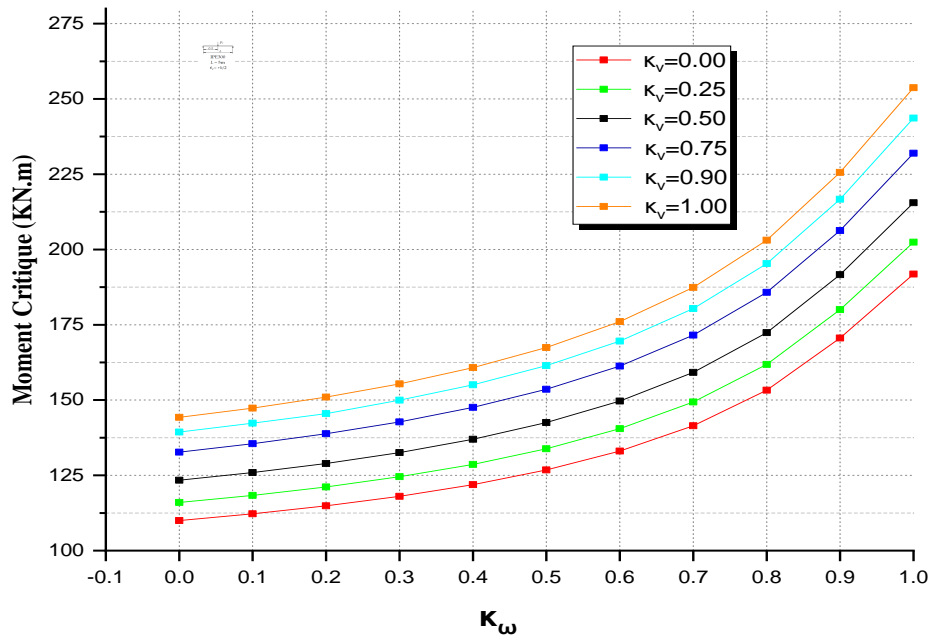


Figure IV.2: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour l'indice de fixité sélectionné κ_v pour une poutre avec charge concentrée à mi-portée.

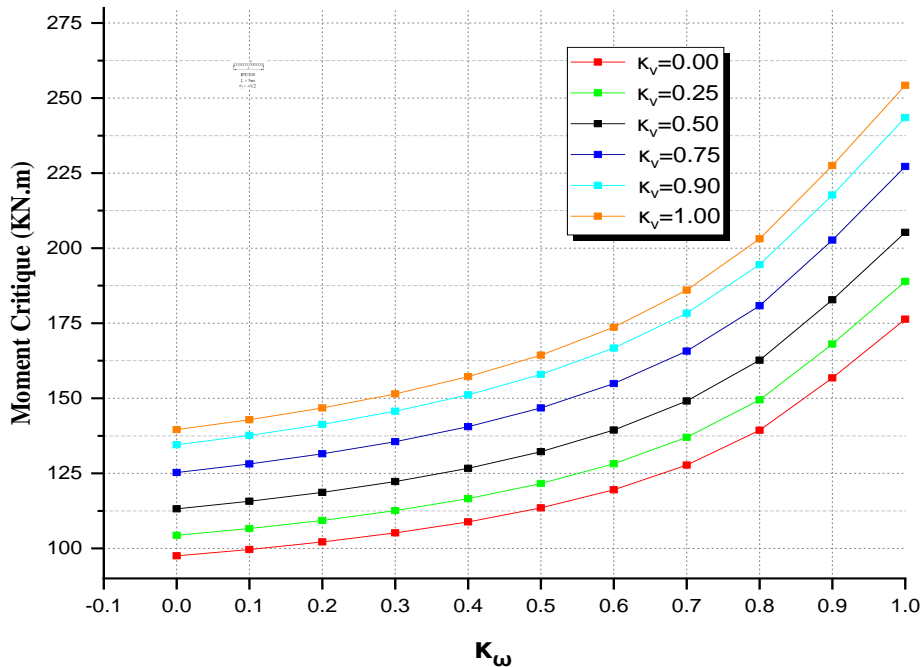


Figure IV.3: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour l'indice de fixité sélectionné κ_v pour une poutre avec une charge uniformément répartie.

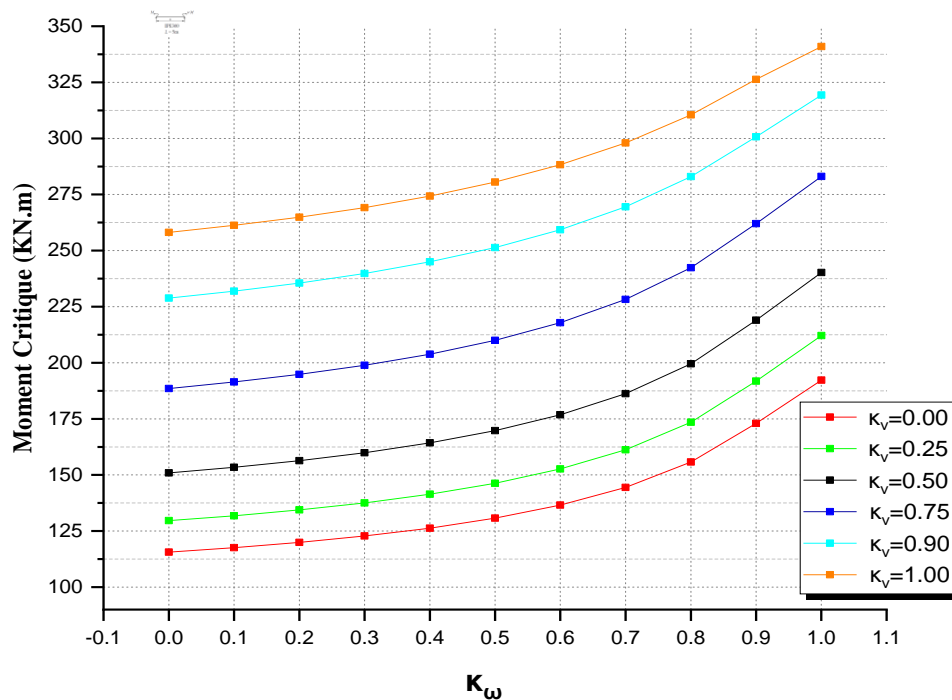


Figure IV.4: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour l'indice de fixité sélectionné κ_v , pour une poutre avec des moments aux extrémités ($\psi = 1$).

La comparaison des moments critiques de déversement latéral par torsion obtenus pour la retenue de gauchissement total ($\kappa_\omega = 1$) par rapport à sa liberté totale ($\kappa_\omega = 0$), montre une augmentation de: +75 % (cas d'une charge concentrée), +82 % (cas d'une charge répartie) et +66 (cas d'un moment aux extrémités) du moment critique M_{cr} , essentiellement quelle que soit la valeur de l'indice κ_v . La dépendance $M_{cr}(\kappa_\omega)$ est fortement non linéaire sur toute la plage de l'indice de contrainte κ_ω (de 0 à 1).

Les figures IV.5; IV.6 et IV.7 présentent la variation du moment critique M_{cr} pour une poutre constituée d'un profilé IPE300 avec un portée $L = 5,00\text{m}$, en fonction de la valeur de l'indice de fixité au gauchissement $\kappa_\omega = \{0 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 0,9 ; 1\}$, et pour des valeurs sélectionnées de l'indice de fixité contre la rotation latérale κ_v (de 0 à 1).

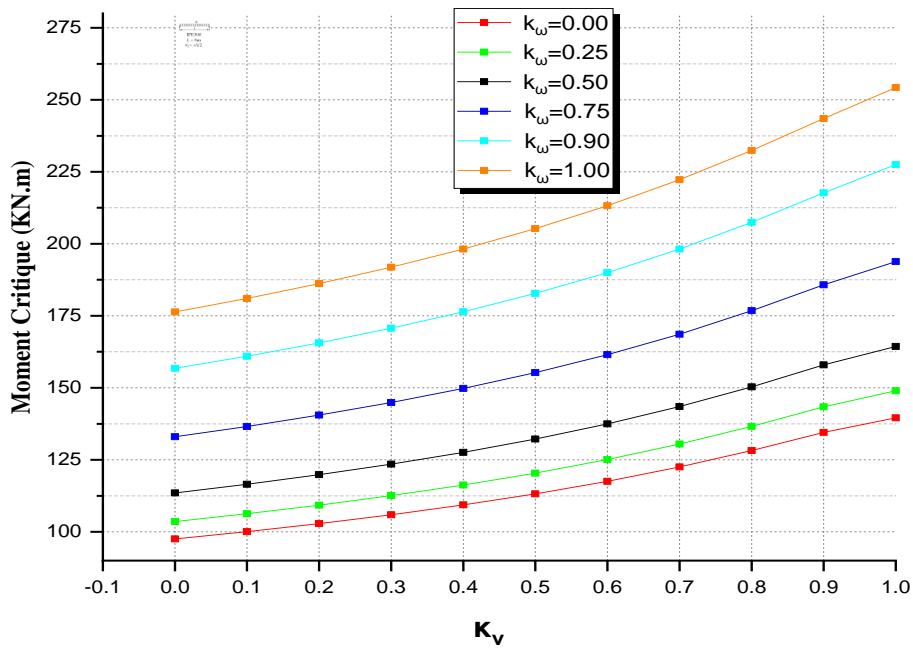


Figure IV.5: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_v , pour l'indice de fixité sélectionné κ_ω pour une poutre avec charge concentrée à mi-portée.

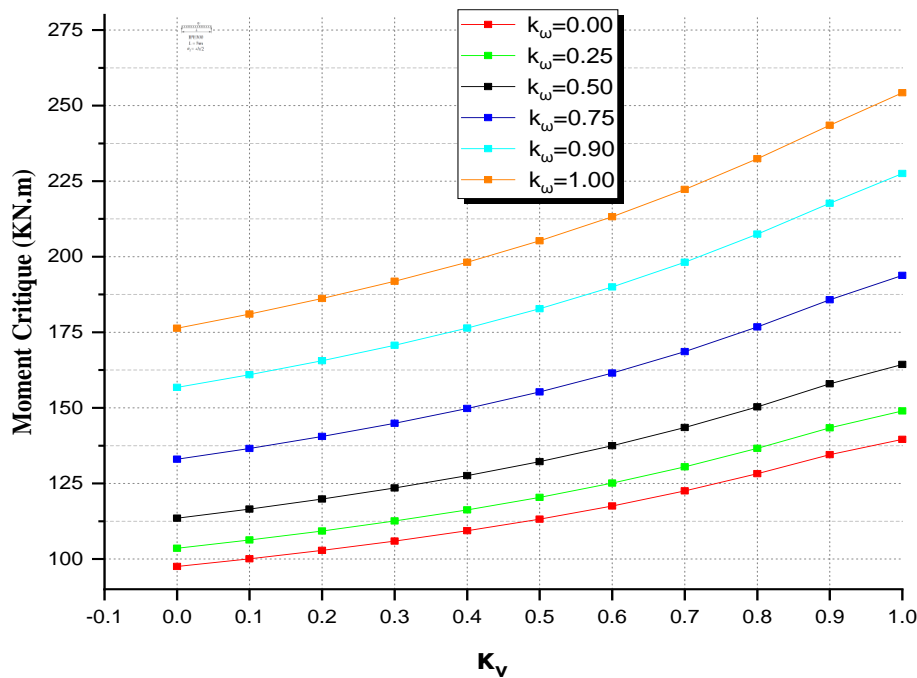


Figure IV.6: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_v , pour l'indice de fixité sélectionné κ_ω pour une poutre avec une charge uniformément répartie.

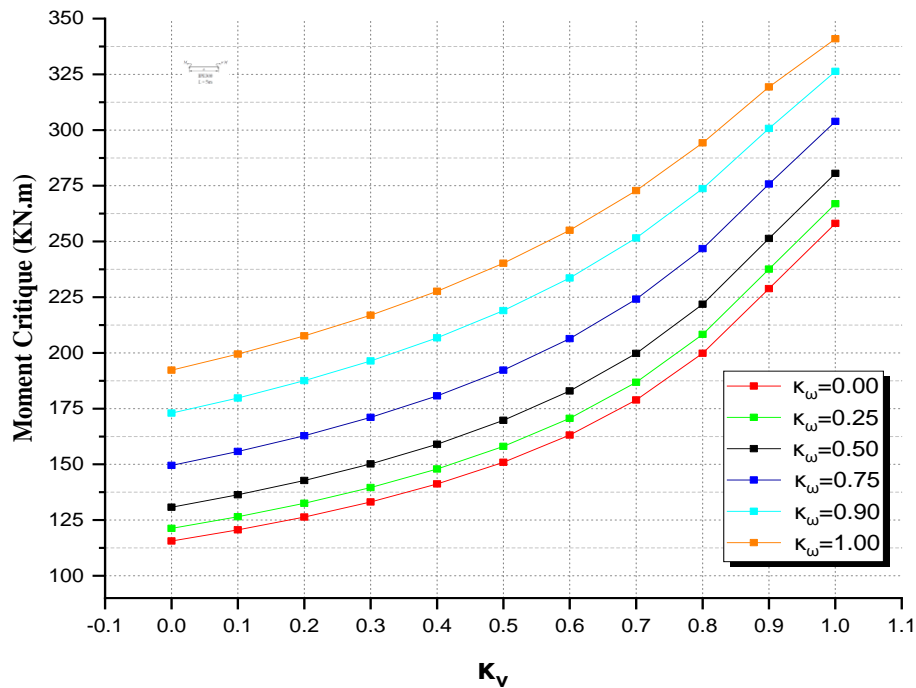


Figure IV.7: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_v , pour l'indice de fixité sélectionné κ_ω pour une poutre avec des moments aux extrémités ($\psi = 1$).

La comparaison des moments critiques de déversement latéral par torsion obtenus pour le maintien en rotation latérale complète ($\kappa_v = 1$) par rapport à sa pleine liberté ($\kappa_v = 0$), annonce une augmentation de: +32 % (cas d'une charge concentrée), +45 % (cas d'une charge répartie) et +123% (cas d'un moment aux extrémités) du moment critique M_{cr} , pratiquement quelle que soit la valeur de l'indice κ_ω . Dans ce cas, la dépendance $M_{cr}(\kappa_v)$ est légèrement non linéaire sur toute la plage de l'indice de contrainte κ_v (de 0 à 1).

Dans le cas (Figure IV.2 à Figure IV.7), le gauchissement et la rotation latérale sont entièrement limités au niveau des supports (c'est-à-dire $\kappa_\omega = \kappa_v = 1$) de la poutre IPE300 de portée $L = 5,00$ m, soit près d'une augmentation du moment critique M_{cr} de +130 % (Figures IV.2 et IV.5), +160% (Figures IV.3 et IV.6) et +195% (Figures IV.4 et IV.7) par rapport aux conditions de liberté totale de gauchissement et de rotation latérale (c'est-à-dire $\kappa_\omega = \kappa_v = 0$), qui correspondent à un appuis de type «appuis à fourche».

IV.3.2. Effet de la longueur de la poutre sur le moment critique de déversement:

Une étude paramétrique a été faite afin de montrer l'influence des caractéristiques géométriques particulièrement la longueur de la poutre sur le moment critique élastique de déversement. A cet effet, nous avons examiné une poutre simplement appuyée en IPE300 avec une hauteur de charge: $e_z=+h/2$. Des poutres avec des longueurs de: 5.00, 6.00, 10.00, 12.00m ont été envisagées.

Les figures IV.8-9-10 retiennent l'évolution du moment critique en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour une valeur fixe de l'indice $\kappa_v=0.50$, et pour les trois cas de charge (charge concentrée, charge répartie et moments aux extrémités).

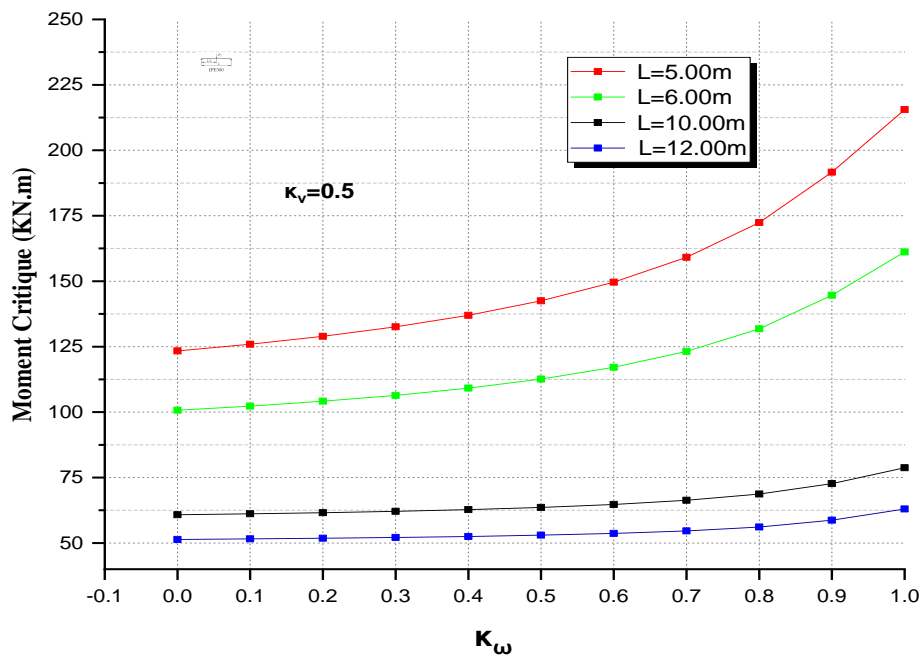


Figure IV.8: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes longueurs L d'une poutre sous charge concentrée à mi-portée.

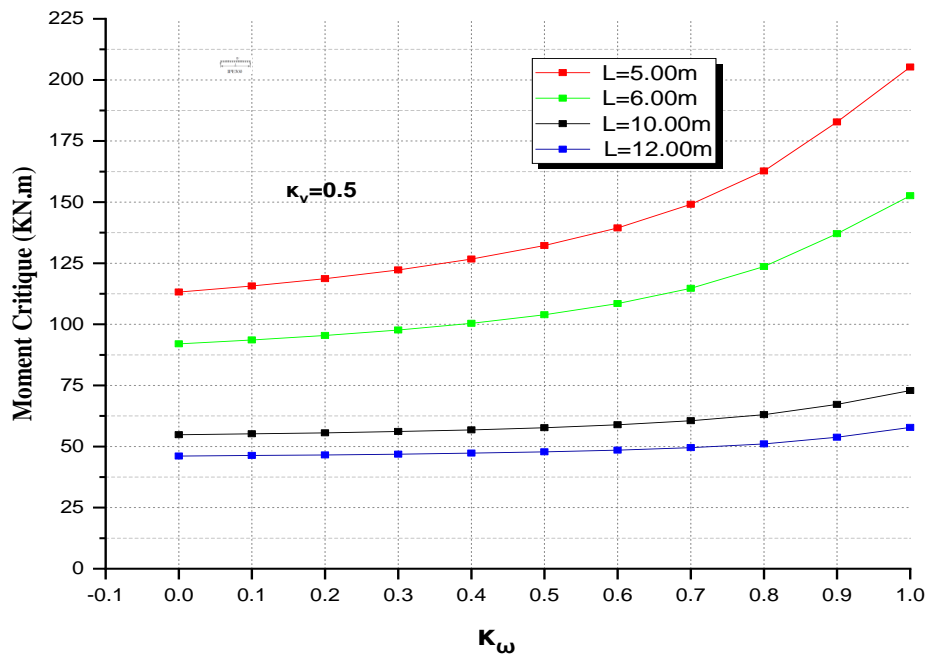


Figure IV.9: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes longueurs L d'une poutre sous charge uniformément répartie.

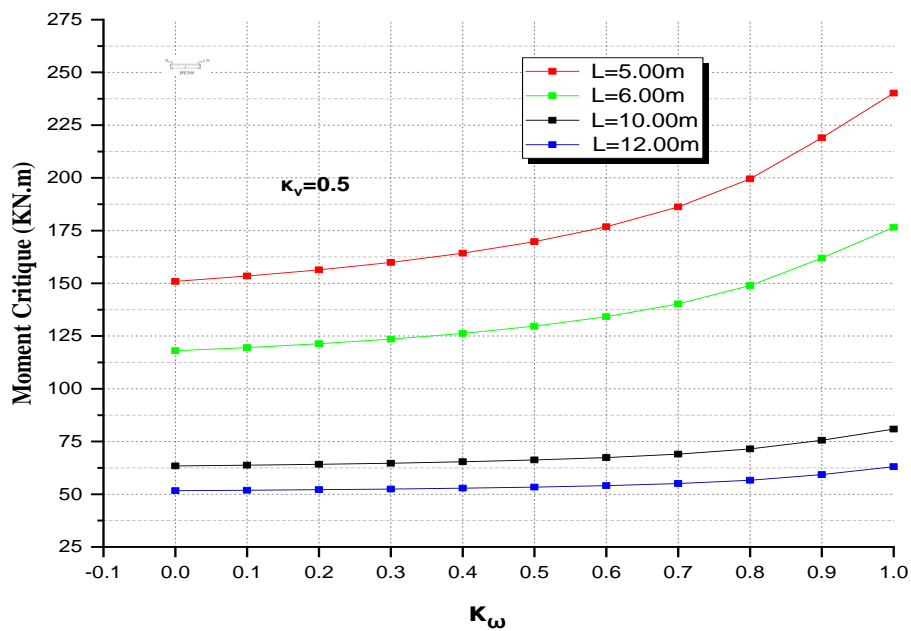


Figure IV.10: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes longueurs L d'une poutre soumise à des moments aux extrémités ($\psi = 1$).

On remarque clairement que le moment critique est affecté par la variation de l'indice de fixité κ_ω pour les poutres de petites portées, contrairement aux poutres de grandes portées où l'influence de cet indice s'est avéré légèrement faible. La comparaison des moments critiques de déversement latéral par torsion obtenus pour la retenue de gauchissement total ($\kappa_\omega = 1$) par rapport à sa liberté totale ($\kappa_\omega = 0$), montre:

- Cas d'une charge concentrée : Une augmentation de: +75 % pour $L=5.00\text{m}$ et 23% pour $L=12.00\text{m}$;
- Cas d'une charge répartie: Une augmentation de: +81 % pour $L=5.00\text{m}$ et 25% pour $L=12.00\text{m}$;
- Cas d'un moment aux extrémités: Une augmentation de: +59 % pour $L=5.00\text{m}$ et 22% pour $L=12.00\text{m}$;

En ce qui concerne les figures IV.11-12-13 présentent l'évolution du moment critique de déversement élastique mais cette fois en fonction de l'indice de fixité κ_ν et pour une valeur fixe de l'indice $\kappa_\omega=0.75$.

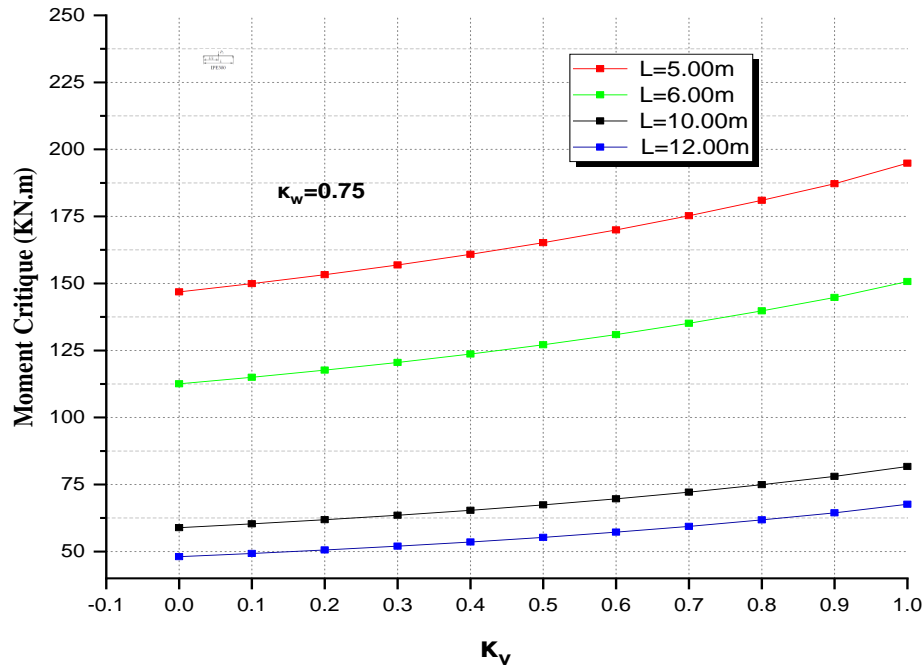


Figure IV.11: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ν , pour différentes longueurs L d'une poutre sous charge concentrée à mi-portée.

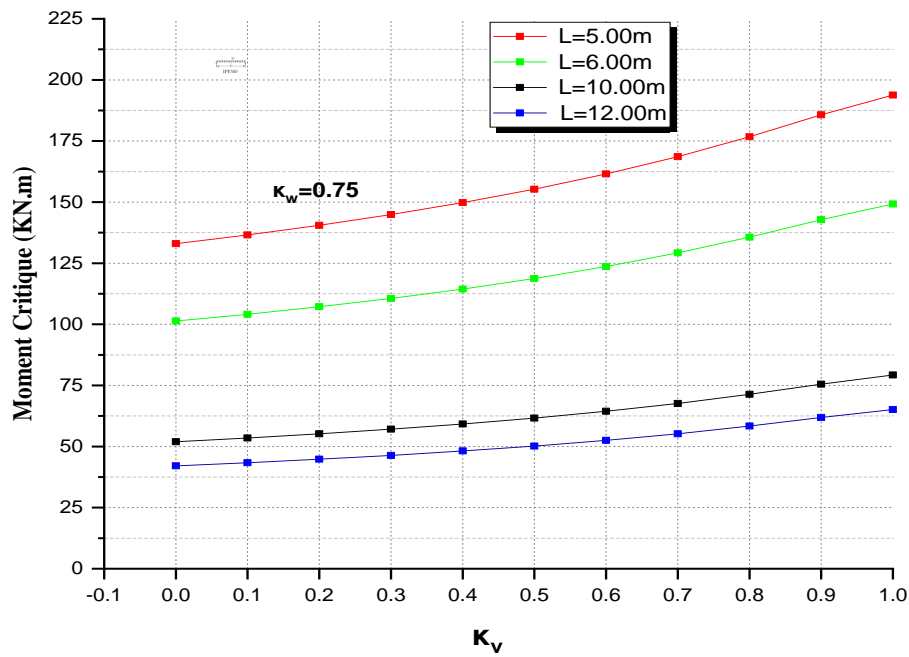


Figure IV.12: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_v , pour différentes longueurs L d'une poutre sous charge uniformément répartie.

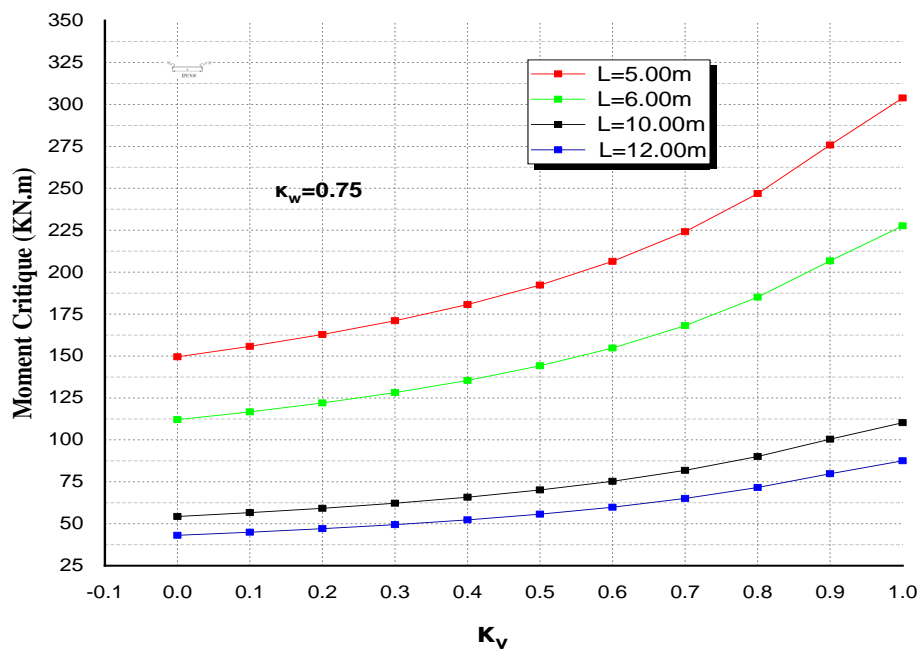


Figure IV.13: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_v , pour différentes longueurs L d'une poutre soumise à des moments aux extrémités ($\psi = 1$).

La comparaison des moments critiques de déversement obtenus pour le maintien en rotation latérale complète ($\kappa_v = 1$) par rapport à sa pleine liberté ($\kappa_v = 0$), annonce:

- Cas d'une charge concentrée : Une augmentation de: +32 % pour $L=5.00\text{m}$ et 40% pour $L=12.00\text{m}$;
- Cas d'une charge répartie: Une augmentation de: +45 % pour $L=5.00\text{m}$ et 54% pour $L=12.00\text{m}$;
- Cas d'un moment aux extrémités: Une augmentation de: +103% pour toutes les longueurs envisagées;

IV.3.3. Effet de la hauteur de charge sur le moment critique de déversement:

Pour l'étude de l'influence de la position de charge e_z (hauteur de charge) sur le moment critique de déversement, nous avons considéré une poutre simplement appuyée d'une section IPE300, d'une longueur $L=6,00\text{m}$. Trois hauteurs de charge sont considérées à savoir: $e_z=+h/2$, $e_z=0$ et $e_z=-h/2$. Ces hauteurs de charge correspondent à la semelle supérieure, le centre de cisaillement G et de la semelle inférieure respectivement.

Les figures IV.14-15 montrent l'évolution du moment critique en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes positions e_z , et pour les trois cas de charge (charge concentrée, charge répartie et moments aux extrémités).

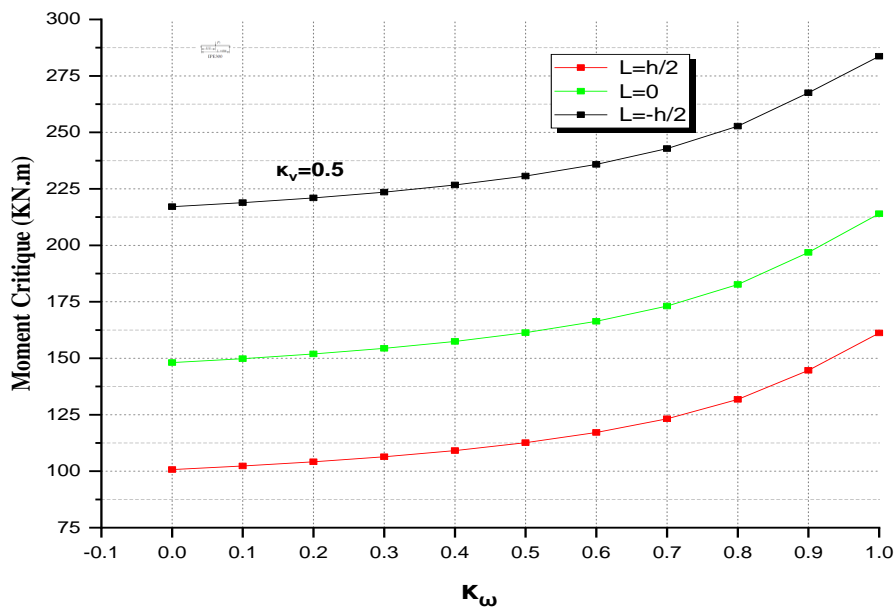


Figure IV.14: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes positions e_z d'une poutre sous charge concentrée à mi-portée.

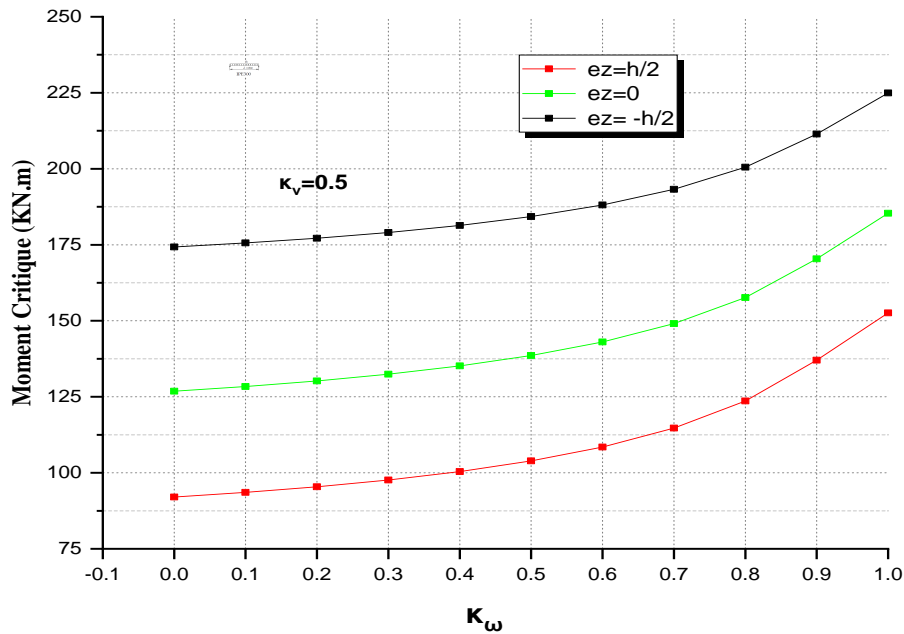


Figure IV.15: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_ω , pour différentes positions e_z d'une poutre sous charge uniformément répartie.

A partir des graphes précédents, on peut constater clairement que quand l'indice de fixité κ_ω augmente la charge critique de déversement élastique augmente avec une variation non linéaire et ce pour les différentes positions de charge (e_z). Cette même charge sera importante pour $e_z = -h/2$ c.-à-d. quand la charge est appliquée au niveau de la semelle inférieure, et elle est moins importantes pour des valeurs de $e_z = +h/2$ c.-à-d. quand la charge est appliquée au niveau de la semelle supérieure. Les valeurs obtenues quand $e_z = 0$ (charge appliquée au centre de gravité) sont supérieures aux valeurs de $e_z = +h/2$ et inférieures aux valeurs de $e_z = -h/2$.

Les figures IV.16-17 présentent l'évolution du moment critique mais en fonction de l'indice de fixité κ_v pour différentes positions e_z , et pour les trois cas de charge (charge concentrée, charge répartie et moments aux extrémités)

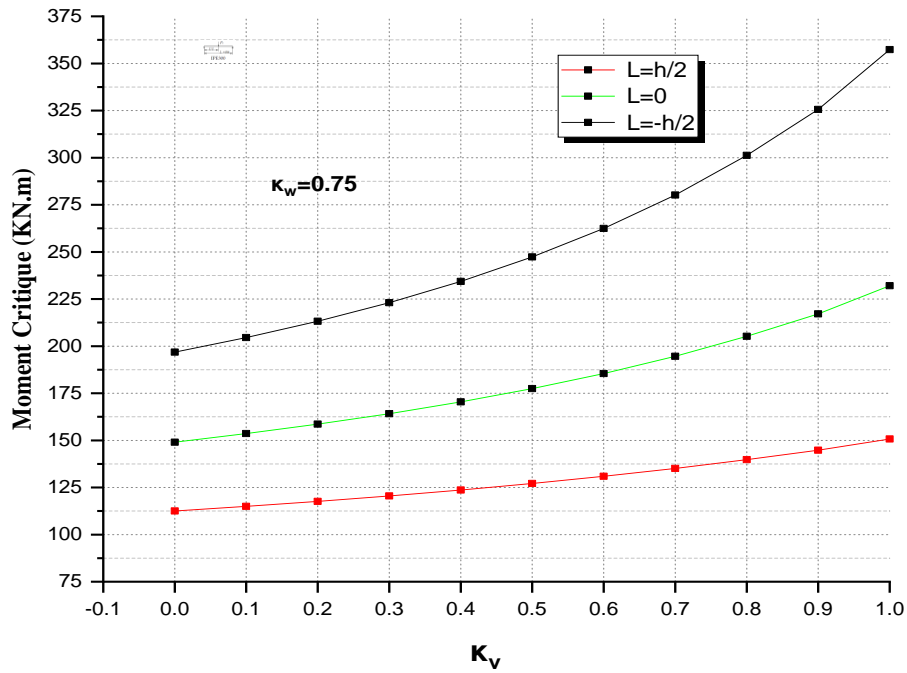


Figure IV.16: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_v , pour différentes positions e_z d'une poutre sous charge concentrée à mi-portée.

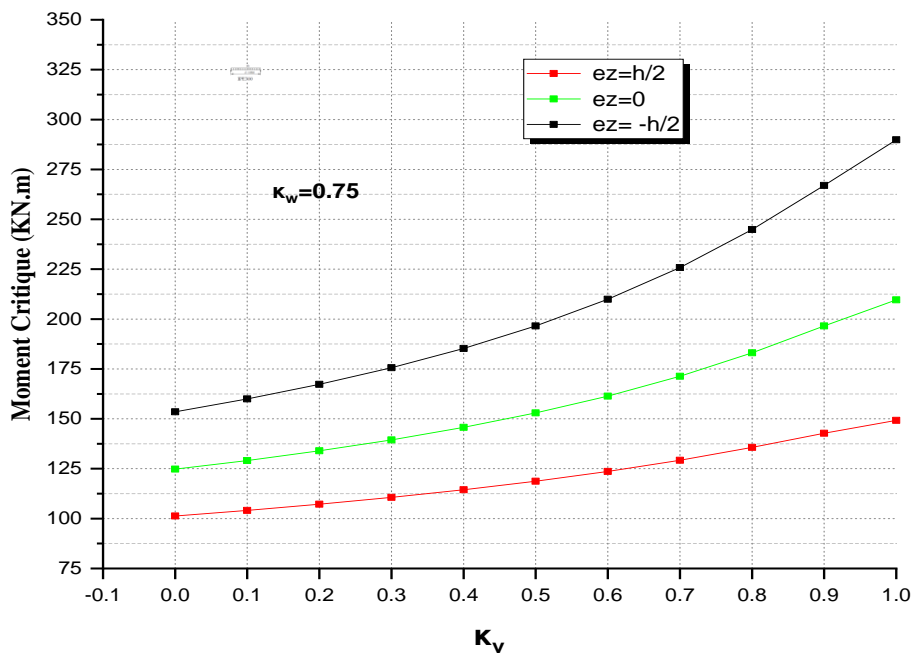


Figure IV.17: Le moment critique de déversement latéral par torsion en fonction de l'indice de fixité κ_v , pour différentes positions e_z d'une poutre sous charge uniformément répartie.

On peut constater à partir des figures précédents que quand l'indice de fixité κ_v augmente la charge critique de déversement élastique augmente avec une variation non linéaire et ce pour les différentes positions de charge (e_z). Cette même charge sera importante en allant de la semelle inférieure ($e_z=+h/2$) vers la semelle supérieure ($e_z=-h/2$). On remarque que le moment critique est fortement affecté par la variation de l'indice de fixité κ_v pour des charges appliquées au niveau de la semelle inférieure.

V.4.Conclusion:

Cette partie présente et discute les résultats de l'étude comparative effectuée afin de valider et d'évaluer la performance du modèle analytique proposé dans l'analyse de déversement élastique des poutres de section bi-symétrique. Cette étude a porté sur une analyse de déversement de plusieurs poutres simplement appuyées soumises à des charges latérales réparties appliqués à des différentes positions dans la section ainsi que des moments concentrés aux extrémités.

Au moyen de ces exemples numériques, Les résultats obtenus indiquent que les estimations des moments critiques dérivées de l'étude, donnent des approximations qui sont suffisante par rapport à ceux obtenus par éléments finis en utilisant le logiciel *LTBeam*. Avec une augmentation des indices de fixité (κ_o, κ_u), la valeur de la charge critique des poutres grandit. Le moment critique pour le déversement latéral par torsion est affecté, dans une plus grande mesure, par la retenue des sections de support de la poutre contre le gauchissement.

Conclusion générale & perspectives.

1- Conclusion générale:

Dans le domaine de la charpente métallique, les structures sont formées de plusieurs pièces assemblées entre elles, afin de résister aux différentes sollicitations extérieures. L'acier permet aux architectes et concepteurs de répondre facilement à ces exigences tout en alliant légèreté et rapidité de construction à la qualité, la fonctionnalité et l'esthétique de l'ouvrage.

Le domaine des constructions ne cesse de s'améliorer et d'aller vers la modernité conceptuelle et architecturale, les poutres métalliques présentent de nombreux avantages, et qui offre une excellente résistance tout en étant de mise en œuvre rapide et facile, ainsi des nombreuses qualités dont la rigidité, la résistance.

Au cours de ce travail, nous nous sommes attachés à analyser le problème de déversement des poutres simplement appuyées en tenant en compte les conditions aux limites (conditions d'appui). Lorsque les conditions réelles d'appui des poutres aux nœuds sont bien représentées, les moments critiques peut être calculé avec plus de précision. Par conséquent, le coefficient de déversement latéral par torsion et la résistance de conception de la poutre peut également être calculée plus précisément. Une telle approche permet de prendre décision plus éclairée concernant la fiabilité structurelle des éléments.

Dans cette étude, un nouvel modèle analytique a été proposé pour analyser la stabilité et le comportement des poutres en acier. Ce modèle permet l'adoption des conditions aux limites classiques (support de fourche) ou une fixité complète. En outre, il tient compte de la retenue élastique de la poutre contre le gauchissement et contre la rotation dans le plan de déversement latéral par torsion au niveau des appuis.

Une étude comparative a été effectuée afin de valider et d'évaluer la performance du modèle analytique proposé dans l'analyse de déversement élastique des poutres de section bi-symétrique. Cette étude a porté sur une analyse de déversement de plusieurs poutres simplement appuyées soumises à des charges latérales réparties et concentrées à mi-portée, appliquées à des différentes positions dans la section ainsi que des moments concentrés aux extrémités.

La comparaison des moments critiques qui ont été déterminés à l'aide du programme élaboré sous *Maple*, avec les valeurs obtenues à partir du logiciel *LTBeam*. Les charges critiques ont été calculées pour :

- Différentes variantes dans la sélection des indices de fixité (κ_ω , κ_u) qui changent dans l'intervalle de 0 à 1 ;
- Divers points (caractéristiques) auxquels des charges transversales ont été appliquées (semelle supérieure, centre de la section et semelle inférieure) ;
- Plage complète de variation du rapport des moments concentrée aux appuis ($0,25 \leq \psi \leq 1$).

Au moyen de ces exemples numériques, Les résultats obtenus indiquent que les estimations des moments critiques dérivées de l'étude, donnent des approximations qui sont suffisante par rapport à ceux obtenus par éléments finis en utilisant le logiciel *LTBeam*. Ce qui confirme l'efficacité du modèle proposé pour prédire le moment critique de déversement.

A partir de ce qui 'a été obtenu comme résultats, on peut conclure que:

- Avec une augmentation des indices de fixité (κ_ω , κ_u), la valeur de la charge critique des poutres grandit. Le moment critique pour le déversement latéral par torsion est affecté, dans une plus grande mesure, par la retenue des sections de support de la poutre contre le gauchissement.
- Les moments critiques de déversement latéral par torsion obtenus pour la retenue de gauchissement total ($\kappa_\omega = 1$) par rapport à sa liberté totale ($\kappa_\omega = 0$), montre une augmentation de plus de 66 % du moment critique M_{cr} , quelle que soit la valeur de l'indice κ_v .
- Les moments critiques obtenus pour le maintien en rotation latérale complète ($\kappa_v = 1$) par rapport à sa pleine liberté ($\kappa_v = 0$), annonce une augmentation de plus 32 % (peut atteindre 123% dans le cas d'un moment aux extrémités) du moment critique M_{cr} , quelle que soit la valeur de l'indice κ_ω .
- Dans le cas où le gauchissement et la rotation latérale sont entièrement limités au niveau des supports (c'est-à-dire $\kappa_\omega = \kappa_v = 1$) de la poutre une augmentation du moment critique M_{cr} peut atteindre 195% par rapport au conditions de liberté totale de gauchissement et de rotation latérale (c'est-à-dire $\kappa_\omega = \kappa_v = 0$), qui correspondent à un appuis de type «appuis à fourche»;
- Le moment critique est affecté par la variation de l'indice de fixité κ_ω pour les poutres de petites portées, contrairement aux poutres de grandes portées où l'influence de cet indice s'est avéré légèrement faible;

- Quand les indices de fixité κ_ω et κ_ν augmentent, la charge critique de déversement élastique augmente avec une variation non linéaire et ce pour les différentes positions de charge (e_z);

2- Perspectives:

Dans notre étude, nous avons traité l'instabilité des poutres en acier, où un nouvel modèle éléments finis FEM a été adoptée afin d'analyser un phénomène d'instabilité qui est le déversement. Néanmoins, d'autres travaux postérieurs de recherche peuvent avoir lieu à savoir:

- Etablissement de formules pour le moment critique de déversement par torsion latérale la retenue élastique des sections de support;
- Etude de l'influence de caractéristiques mécaniques sur l'instabilité des poutres en acier avec la prise en compte des conditions aux appuis;
- Effet de la retenue élastique des sections de support de la poutre contre le gauchissement et la rotation sur l'instabilité des poutres cellulaires;

Références Bibliographiques

- [1] **Diallo, Ibrahima** mémoire présenté en vue d'obtention le diplôme d'ingénieur de CNAM "INSTABILITE EN CONSTRUCTION METALLIQUE : ETUDE DE VOILEMENT D'AME DES PROFILES RECONSTITUES SOUDES SUIVANT LES REGLES DU CN66, DE L'ADDITIF 80 ET L'EUROCODE 3.
- [2] **Mekhlouf Omar et Mensour Nabil** , mémoire de fin d'étude "ETUDE DE FLAMBEMENT DES STRUCTURES METALLIQUES "2018/2019
- [3] **MOKHTARI RIADH**, mémoire de fin d'étude "ETUDE DU FLAMBEMENT DES POUTRE, AVEC PRISE EN CHARGE DES DEFAUTS GEOMETRIQUE"2020/2021
- [4] **Calcul des structures métalliques selon l'eurocode 3**, Jean Morel, une nouvelle norme européenne .Eyrolles 1993.
- [5] **Houari Et Khamkham**, mémoire de fin d'étude " Influence des contraintes résiduelles sur le comportement des poutres métalliques" , université Tiaret, 2021/2022.
- [6] **Bencherif Et Belalia**, mémoire de fin d'étude " Etude de la stabilité latérale des poutres métalliques." , université Tiaret, 2021/2022.
- [7] **Belaid Toufik**, Thèse de Magister " Etude de la stabilité latérale des éléments en acier à section mono symétrique - cas des profilés en U " , université USTHB, 2009.
- [8] **Timoshenko S.P**, Théorie de la stabilité élastique. Dunod, 1966.
- [9] **Hirt M.A., Bez R., Nussbaumer A. (2006)**, Construction Métallique, Notions Fondamentales et Méthodes de Dimensionnement, Traité de Génie Civil, vol.10, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- [10] **ECCS (2010)**, Design of steel structures, Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1-1 – General rules and rules for buildings 1st Edition, European Convention for Constructional Steelwork, Ernst & Sohn. 2010.
- [11] **Clark J. W, Hill H. N. (1960)**, Lateral Buckling of Beams, Proceedings ASCE, Journal of the Structural Division, Vol 86, no. ST7, 1960.

- [12] **Boissonnade N., Greiner R., Jaspert J.P, Lindner J. (2006)**, Design rules in EN 1993-1-1 for member stability, ECCS Technical Committee 8: Structural Stability, P119, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels.
- [13] **l'Eurocode3**, « Calculer des structures en acier » a été adopté par la Comité européen de normalisation (CEN) en 1992 et a été classé Norme provisoire pour une durée de 3 années (1993 à 1996).
- [14] **BOUDJEMIA Ahmed** , Thèse De Doctorat, "Etude et simulation numerique (3D) des poutres métalliques a sections dissymétriques sous l'action du deversement".
- [15] **AbderrahimLabeled** ,Cours de Constructions Métalliques Master VOA 2019 2020.
- [16] **Saoula Abdelkader**, Thèse De Doctorat , "Etude de l'instabilité des poutres métalliques à parois minces" ;07 Décembre 2015.
- [17] **Djalaly H. (1974)**, La théorie du second-ordre de la stabilité élastique des barres à parois minces et profil ouvert et son application. Annales de l'ITBTP, N° 171, Sept. 1974, pp. 130-162.
- [18] **Bureau A. (2006)**, NCCI: Elastic critical moment for lateral torsional buckling. Paris CTICM, 2006.
- [19] **AISC (2005)**, Specification for Structural Steel Buildings, 13th Ed. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2005.
- [20] **Saint-Venant A. J. C. B. (1847)**, Mémoire sur la torsion des prismes et sur la forme affectée par leurs sections transversales primitivement planes. Comptes rendus, Vol. 24, 1847, pp. 485-488.
- [21] **Le théorie d'Euler**, Contrainte critique due à la compression, Calcul des structures métalliques selon l'Eurocode 3, sixième tirage 2005, éditions Eyrolles.
- [22] **Eurocode4**, L'Eurocode 4 concerne uniquement les exigences de résistance, d'aptitude au service, de durabilité et de résistance au feu des structures mixtes.
- [23] **ABAQUS standard user's manual**, version 6.4. Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc. Pawtucket, RI, USA: ABAQUS; 2003.

- [24] **Rafał Piotrowski and Andrzej Szychowski** "Lateral Torsional Buckling of Steel Beams Elastically Restrained at the Support Nodes", *Applied sciences, Appl. Sci.* 2019, 9, 1944; doi:10.3390/app9091944, 2019.
- [25] **Szychowski, A.** "A theoretical analysis of the local buckling in thin-walled bars with open cross-section subjected to warping torsion". *Thin-Walled Struct.* 2014, 76, 42–55, doi:10.1016/j.tws.2013.11.002.
- [26] **Lim, N.H.; Park, N.H.; Kang, Y.J.; Sung, I.H.** "Elastic buckling of I-beams under linear moment gradient". *Int. J. Solids Struct.* 2003, 40, 5635–5647, doi:10.1016/S0020-7683(03)00330-5.
- [27] **López, A.; Yong, D.J.; Serna, M.A.** "Lateral-torsional buckling of steel beams: A general expression for the moment gradient factor". In *Proceedings of the Stability and Ductility of Steel Structures, Lisbon, Portugal, 6–8 September 2006.*
- [28] Site internet: <https://www.aquaportail.com>.
- [29] Site internet: <https://notech.franceserv.com/deversement.html>.
- [30] Site internet: <https://metaletech.com>.
- [31] Site internet: <https://www.researchgate.net>.