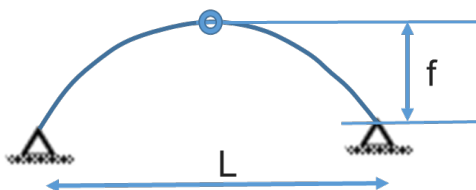


1. Introduction et ordres de grandeur

L'arc est une poutre courbe, dont la ligne moyenne, habituellement circulaire ou parabolique, est située dans un plan vertical, ou très légèrement incliné.

Les arcs sont pour la plupart articulés aux naissances avec couramment une rotule interne à la clé pour les rendre statiquement déterminés ou isostatiques et insensibles aux variations de la température. On parle dans ce cas d'arc plein cintre.



Arc plein cintre

Pour les ouvrages de très grandes portées, des arcs encastrés aux naissances sont projetés et construits. Outre, la redistribution et la réduction des efforts internes, l'encastrement améliore le comportement de l'arc vis-à-vis des instabilités. Ceci est bien entendu au prix de massifs d'ancrages imposants et de sollicitations importantes dues à la variation de la température.

Les ponts en arc, en général, sont dimensionnés avec un critère majeur qui est le flambement. Le flambement des arcs est étroitement lié à un paramètre d'élancement, égal au rapport f/L , appelé le surbaissement des arcs, dont ci-après quelques ordres de grandeur.

Le rapport f/L (f la flèche de l'arc et L sa portée) est la clé de la conception des arcs pour juger de leurs comportements. Ce rapport, le surbaissement, nous alerte directement dès le début des études sur la sensibilité ou non de l'ouvrage vis-à-vis du risque de flambement. La valeur du surbaissement se situe normalement autour de $1/5$ avec une large variation amenant à avoir une fourchette variant entre $1/10$ et $1/2$ pour le rapport f/L .

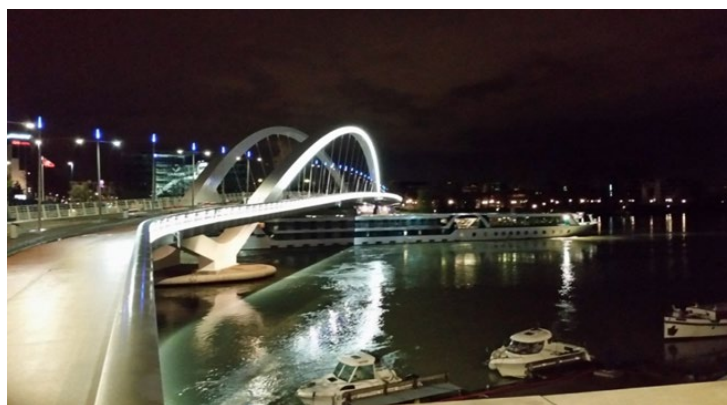
Néanmoins, en France, des ponts en arc emblématiques construits peu avant le siècle dernier possèdent des surbaissements exceptionnels. Le pont routier Alexandre III à Paris conçu et étudié par Jean Résal possède un rapport f/L très faible égal à $0,058$ ($f=6,28$ m et $L= 107,50$ m).

Très récemment, le pont citadelle à Strasbourg, conçu par Egis et étudié par le CTICM, a un surbaissement de $0,2$ - $1/5$ - ($f = 38$, $L=193$ m – On note au passage que ce pont marque un record en France en terme de longueur de portée des ponts en arc indépendant voir CMI [1]



Massif d'ancrage du pont Citadelle à Strasbourg : platine d'ancrage 5,5 m x 2,6m – Ep 80 mm – Acier S460

Un autre exemple : Le pont Raymond Barre à Lyon conçu par l'architecte Alain Spielmann et SETEC ALS et étudié au CTICM possède un surbaissement $f/L = 0,14 - 1/7,4$ ($f = 19$ m, $L=140$ m)



Pont Raymond Barre à Lyon

Ces ordres de grandeur, montent et confirment la nécessité de faire un choix judicieux des différents paramètres et de concevoir les arcs avec une flèche minimale égale à $L/5$ à $L/8$.

2. Flambement des arcs

Trois modes d'instabilité des arcs sont à étudier pour s'assurer de la résistance et du bon comportement de l'ouvrage

- Flambement hors plan. Ce mode est généralement facile à éviter par la mise en place du contreventement entre les arcs et par la présence du tablier reliant les arcs constitutifs du pont.
- Flambement par affaissement dans le plan de l'arc « Snap-Through »

Sous l'effet des charges et à partir de certaines dimensions l'arc risque de passer par bifurcation en-dessous de sa ligne moyenne théorique comme le montre la figure ci-dessous.

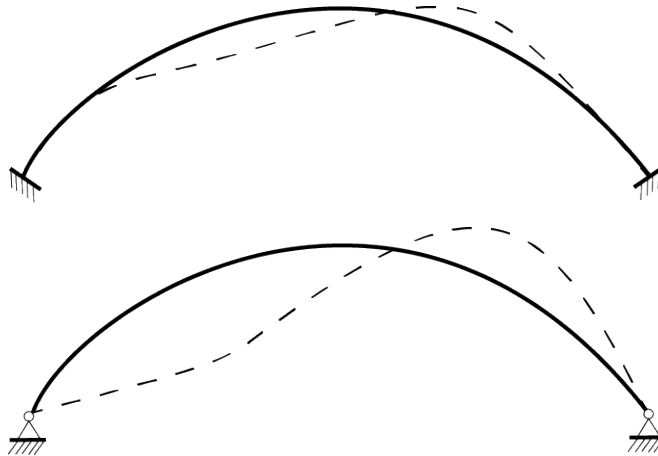


Affaissement de l'arc dans son plan « Snap-Through »

- Flambement asymétrique dans le plan

C'est le mode d'instabilité le plus à craindre car il est lié à la fois :

- à l'intensité des sollicitations et de l'effort normal interne en particulier ;
- aux paramètres définissant le surbaissement : flèche et portée ;
- aux dimensions et forme de la section transversale : caisson, poutre en I ou H ;
- aux conditions d'appui : articulations aux naissances ou encastrement.



Flambement asymétrique de l'arc dans son plan

Nous présentons par la suite le calcul pour le flambement de l'arc dans son plan.

3. Effort normal critique et procédure de vérification

3.1 Flambement par affaissement de l'arc dans son plan « Snap-Through »

Il est très impératif d'éviter et de se prémunir du flambement par affaissement de l'arc dans son plan, il est dangereux de concevoir des arcs sensibles à ce mode de flambement. Il est important de concevoir des arcs où ce mode d'instabilité est très largement éloigné des autres modes d'instabilité.

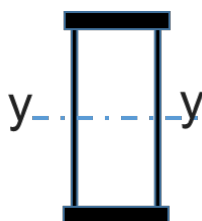
Les références [2, 3 et 5] montrent que le flambement par affaissement « Snap-Through » n'est pas à craindre si la section transversale de l'arc possède des propriétés statiques respectant la relation : $0,28L/r > (L/r)$ critique

L : est la portée de l'arc

A : aire de la section transversale

I_y : moment d'inertie selon l'axe fort (axe perpendiculaire au plan de l'arc)

r : Rayon de giration = $\sqrt{I_y/A}$



(L/r) critique : est le paramètre critique au-delà de laquelle l'arc est sensible au flambement par affaissement. Ce paramètre critique dépend essentiellement de la valeur du surbaissément de l'arc et de ses conditions d'appui. Cette longueur est donnée dans les tableaux suivants

Arcs bi-articulés	
f/L	(L/r) critique
0,05	35
0,075	23
0,10	17
0,15	10
0,20	8

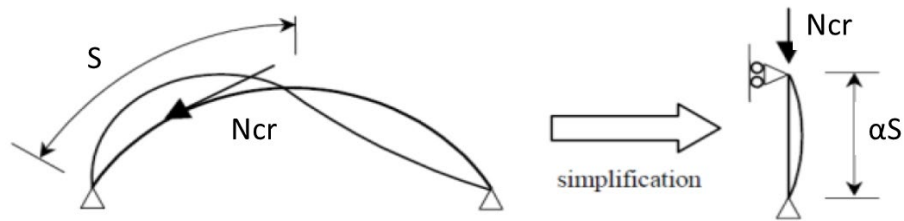
Arcs bi-encastés	
f/L	(L/r) critique
0,05	319
0,075	97
0,10	42
0,15	13
0,20	6

Pour des valeurs de surbaissément f/L supérieures à 0,2 le risque de flambement par affaissement est inexistant. A titre d'exemple, un arc circulaire de bâtiment de portée 30 m et de flèche 10 m n'est pas sujet à ce mode d'instabilité.

Le lecteur pouvant aussi remarquer que plus la section est faible, le risque d'occurrence de ce mode d'instabilité s'éloigne compte tenu de l'apparition des autres modes d'instabilité.

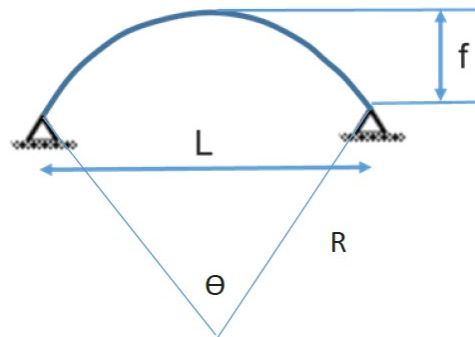
3.2 Flambement asymétrique de l'arc dans son plan sous charges verticales

Une simplification courante pour étudier le flambement asymétrique consiste à assimiler l'arc à un poteau bi-articulé



S est la demi-longueur de l'arc.

Pour un arc circulaire $S = \Theta R/2$



Pour un arc parabolique funiculaire d'équation $y(x) = \frac{4fx}{L}(1 - \frac{x}{L})$ la longueur S est donnée par le développement suivant

$$S = 0,5L(1 + \frac{8f^2}{3L^2} - \frac{32f^4}{5L^4} \dots \dots)$$

L'effort Ncr est donné par les expressions

1- Arcs bi-articulés

➤ Circulaires

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{(1,1 \times s)^2} \quad \text{Pour } 0,1 \leq f/L < 0,3$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{(1,2 \times s)^2} \quad \text{Pour } 0,3 \leq f/L \leq 0,5$$

➤ Paraboliques

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{(1,0 \times s)^2} \quad \text{Pour } 0,1 \leq f/L \leq 0,5$$

2- Arcs bi-encastés

➤ Circulaires

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{(0,8 \times s)^2} \quad \text{Pour } 0,1 \leq f/L \leq 0,5$$

➤ Paraboliques

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{(0,8 \times s)^2} \quad \text{Pour } 0,1 \leq f/L < 0,3$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{(0,7 \times s)^2} \quad \text{Pour } 0,3 \leq f/L \leq 0,5$$

3.3 Démarche de vérification

Une fois l'effort critique est calculé. La démarche de vérification est la suivante :

- 1) On calcule l'effort normal NEd au niveau de la section située à L/4
- 2) Si $N_{cr} < 3$ fois NEd - Refaire la conception, changer les sections afin d'avoir N_{cr} au moins égal à 3 fois NEd
- 3) Si $N_{cr} > 10$ fois NEd – c'est très rare pour les arcs de grande et moyenne portée mais la situation est favorable. On utilise les sollicitations issues du calcul RdM usuel au premier ordre et on procède aux différentes vérifications selon l'EN1993-2 pour les ponts et l'EN 1993-1-1 pour les bâtiments
- 4) Si $3 < \alpha_{cr} = N_{cr}/N_{Ed} < 10$ il faut prendre en compte les effets de deuxième ordre

- Soit par la réalisation d'un calcul non linéaire au deuxième ordre c'est à dire un calcul non-linéaire géométrique en injectant les imperfections [3 et 6]
- Soit en multipliant les moments fléchissant issus du calcul au premier ordre par un facteur d'amplification égal à $\alpha_{cr} / (\alpha_{cr} - 1)$. Ou en d'autres termes :

$$M (2^e \text{ ordre}) = M (1^{er} \text{ ordre}) \times \text{Facteur}$$

Si par exemple α_{cr} est égal à 3,1 on aura un facteur d'amplification égal à 1,5.

Après majoration, la vérification consiste, à suivre la démarche de l'EN 1993-1-1 pour la vérification au flambement avec les interactions des sollicitations.

Dans un prochain numéro, on donnera un exemple numérique d'application pour un arc dans le domaine du bâtiment et dans le domaine des ponts.

4. Références

[1] CMI : magazine d'information de la construction métallique – N°1-2016 – Le pont Citadelle à Strasbourg – L'élégance des courbes

[2] AISC : Design Guide 33 : Curved Member Design – 2018

[3] NF EN1993-2 Calcul des structures en acier - Partie 2 : ponts métalliques - 2007

[4] TIMOSHENCO & GERE : Theory of Elastic Stability International student edition – McGraw-Hill – printing 1985

[5] D. BITAR : Conception avancée des ponts métalliques – Cours de Ponts Métalliques – CHEM & ENPC.

[6] NF EN 1993-1-1 – 2005 - Calcul des structures en acier - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments